

Toni Saarinen

Verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan hyötysuhde

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Koulutusohjelman nimi

Insinöörityö

13.5.2015

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Toni Saarinen Verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan hyötysuhde 43 sivua + 2 liitettä 13.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Eero Kupila
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Työssä tutkittiin verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan hyötysuhdetta erilaisilla kuormituksilla ja generaattorin pyörimisnopeuksilla. Mittaukset suoritettiin Metropolian sähkönkäytön laboratoriotiloissa, jossa perehdyttiin mittausten soveltuvuutta tuleville opiskelijoille. Tavoitteena oli tehdä mittauksista uusi laboratorioryhmätyö opiskelijoille ja antaa opettajille uusia ajatuksia uuden työn aikaansaamiseksi. Työssä pohdittiin oikeanlaista mittauskäytäntää mittaustulosten aikaansaamiseksi ja analysoitiin saadut tulokset.</p> <p>Työn alussa tutustuttiin taajuusmuuttajan teoria osuuksiin käyttäen alan kirjallisuutta apuna. Teoria osuuksissa esitettiin taajuusmuuttajan peruskomponentteja, erilaisia ohjaustapoja ja erilaisia taajuusmuuttajan jarrutustapoja. Seuraavaksi esitettiin mittauskäytäntä, jolla mittaukset suoritettiin. Työn loppuvaiheessa suoritettiin mittaukset käyttäen tasavirtamoottoria jonka akselin päässä oli oikosulkumoottori, joka pyörii generaattorina. Generaattorin toiseen päähän kytkettiin Vaconin kaksi taajuusmuuttajaa, joista ensimmäinen toimii generaattorin kuorman antajana ja toinen jarrutusenergian verkkoon päin siirtävänä yksikönä. Taajuusmuuttajien molemmille puolille asennettiin tehoanalysaattori, joka mittasi tehollisarvoja. Mitatuista tehollisarvoista voitiin laskea jarrutuksen hyötysuhde.</p> <p>Työssä tehtyjen testien perusteella voitiin todeta, että jarruttavaa energiaa siirtyi verkkoon päin, mutta hyötysuhde jäi aika alhaiseksi. Syynä siihen oli, että generaattori oli liian pieni nimellisarvoiltaan ja alun perin mittaukset piti suorittaa isommalla tahtikoneella, mutta verkkoon jarrutusta ei saatu aikaiseksi tahtikoneen ollessa liian iso. Tämän takia jouduttiin tyytymään pienempään generaattoriin.</p>	
Avainsanat	taajuusmuuttaja, verkkoon jarrutus, AFE, hyötysuhde

Author Title Number of Pages Date	Toni Saarinen Frequency converters regeneration efficiency 43 pages + 2 appendices 13 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power engineering
Instructor	Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>This final year project was carried out Metropolia University of Applied Sciences. In this thesis the idea was to study how frequency converter transfers regenerating energy to electrical network with different loads and generator speeds. The main objective was to determine frequency converters transfer efficiency. The tests were carried out in the Metropolia University of Applied Sciences electrical and energy technology laboratories. The goal was to examine if the tests are suitable for future students. The aim was to make a new laboratory tests for students to study and help teachers to create some new ideas for students to work with. The projects second main purpose was to consider the correct measuring circuit to obtain reliable test results, and analyze the results obtained.</p> <p>The first part of this study explains the theoretical parts of frequency converter using literature of this subject. Theoretical parts contain the basic components of the frequency converter, different control methods and ways to transfer regenerating energy. The Second part is the presentation of the measuring circuit which the tests were made for. The Final stage is the measurements. Measurements were carried out by using a DC-motor. In other end of the DC-motors axis is an induction motor, which spins as a generator. Two frequency converters were installed to the other end of the generator. The first converter right after the generator acts as a load to the generator and the second converter is connected to the mains which transfer the power to the network. There is also a power analyzer connected in between the generator and the converter and the converter and the mains. The power analyzer gives important data, such as how the efficiency of the regeneration behaves on different loads and speeds.</p> <p>The results show that the regenerating energy was born and the converter unit was able to transfer the energy to the mains, but efficiency was pretty low. The reason for bad efficiency is too small generator. At first the tests were to be made by bigger synchronous generator but during the tests it was too big for the test. So tests were to be made by using a DC-motor and an induction motor.</p>	
Keywords	frequency converter, regeneration, AFE, efficiency

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taajuusmuuttaja	2
2.1	Taajuusmuuttaja tyypit	2
2.2	Taajuusmuuttajan toiminta	3
2.2.1	Tasasuuntaaja	3
2.2.2	Välipiiri	4
2.2.3	Vaihtosuuntaaja	4
2.3	Taajuusmuuttajan säätötavat	6
2.3.1	Skalaariohjaus ja -säätö	7
2.3.2	Vektorisäätö	9
2.3.3	Suora vääntömomentin säätö	9
2.4	Taajuusmuuttajalla moottorin jarruttaminen	11
2.4.1	Vuojarrutus	11
2.4.2	DC-virtajarrutus	12
2.4.3	Jarruvastus/jarrukatkoja	12
2.4.4	Monimoottorikäyttö	12
2.4.5	Verkkoon jarrutus	14
2.4.6	Taajuusmuuttajasta aiheutuvat häiriöt eli yliaallot	18
2.4.7	Taajuusmuuttajan höytysuhde	18
3	Mittauskytkennän esittely	18
3.1	DC-kone	19
3.2	Generaattori	20
3.3	Tehoanalysaattori	21
3.4	Taajuusmuuttaja ja AFE yksikkö	21
3.5	AFE yksikön toiminta	23
4	Mittausten aloittaminen	24
5	Mittaustulokset	26
5.1	Tehollisarvojen analysointi	26
5.1.1	Jännite jarrutushetkellä	27
5.1.2	Virta jarrutushetkellä	27
5.1.3	Pätöteho jarrutushetkellä	29
5.1.4	Loisteho jarrutushetkellä	31

5.1.5	Näennäisteho jarrutushetkellä	32
5.1.6	Höytysuhde jarrutuksessa	32
5.2	Kompensointi	36
5.2.1	Kompensoinnin vaikutus höytysuhteeseen jarruttaessa	36
5.2.2	Kompensoinnin tulostenkäsittely	37
6	Yhteenveto	41

Lähteet

Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.³

Liitteet

Liite 1. Tehoanalysaattorista mitatut tehollisarvot sekä tehollisarvo käyrät

Liite 2. Kompensoinnin tehoanalysaattoriarvot

Lyhenteet

AFE	Active Front End. Vaconin taajuusmuuttaja sovellus, jolla voidaan siirtää jarrutusenergiaa verkkoon.
CSI	Current Source Inverter. Epäsuora taajuusmuuttaja joka on virtavälipiirillinen.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor. Suuritehoinen bipolaaritransistori.
PAM	Pulse Amplitude Modulation. Pulssin amplitudinmodulointi.
PWM	Pulse Width Modulation. Pulssin leveysmodulointi.
VSI	Voltage Source Inverter. Epäsuora taajuusmuuttaja joka on jännitevälipiirillinen

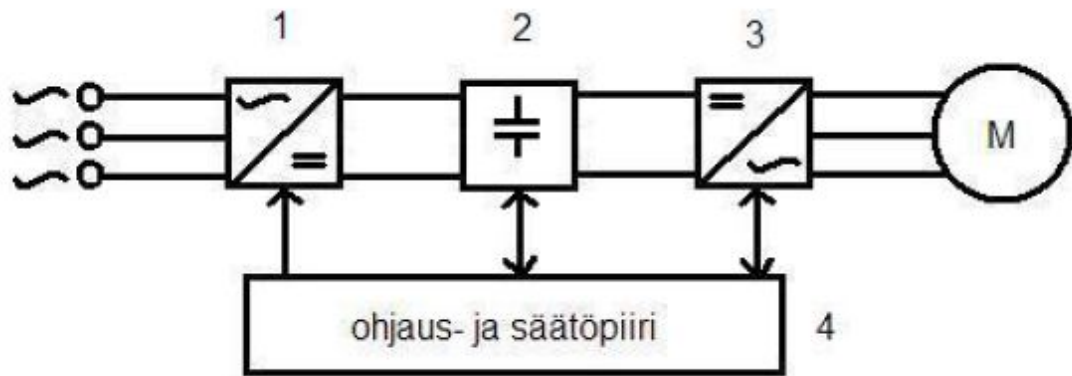
1 Johdanto

Tässä insinöörityössä pohditaan, soveltuvuutta verkkoon jarrutusmittauksesta tuleville opiskelijoille laboratoriomittaukseksi. Työssä perehdytään taajuusmuuttajalla jarrutusenergian mittaamiseen ja siirtämiseen verkkoon päin, jossa päätavoitteena on tutkia jarrutuksen hyötysuhdetta. Mittaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun sähkökäytön laboratoriotiloissa käyttämällä Vaconin kahta taajuusmuuttajaa.

Aluksi tutustutaan taajuusmuuttajan toiminnan perusteisiin peruskomponenteista ohjaukseen, minkä jälkeen tutustutaan taajuusmuuttajalla eri jarrutustapoihin. Teoriaosuuden jälkeen esitellään suunniteltu mittauskytkentä ja siihen käytetyt komponentit ja mikä on komponenttien tarkoitus kytkennässä. Samalla kerrotaan mittausten tavoitteet. Kytkennän esittelyn jälkeen käydään läpi mittausten aloittaminen parametri parametrilta, minkä jälkeen esitetään tulokset. Tulosten esittelyvaiheessa käydään kaikki tehollisarvot läpi ja pohditaan arvojen oikeellisuutta kuvakäyrien avulla. Työn yhteenvedossa kappaleessa pohditaan mittausten soveltuvuutta tuleville opiskelijoille sekä kannattavuutta ja mittausten onnistuneisuutta.

2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajia käytetään muun muassa moottoreiden ja generaattoreiden ohjaukseen ja säätöön, jonka avulla voidaan optimoida laitteen energiankulutusta. Taajuusmuuttaja säästää energian kustannuksissa siten, että moottorin pyörimisnopeutta voidaan muuttaa taajuutta muuttamalla ja tällöin moottorin ei tarvitse pyöriä koko ajan nimellisa nopeudella. Taajuusmuuttajakäytössä moottoria voidaan pyörittää halutulla pyörimisnopeudella riippumatta syöttävän verkon taajuudesta. Taajuusmuuttaja voidaan jakaa neljään eri pääosaan kuvan 1 mukaan: Tasasuuntaajaan (1), välipiiriin, (2), vaihtosuuntaajaan (3) ja ohjaus- ja säätöpiiriin.



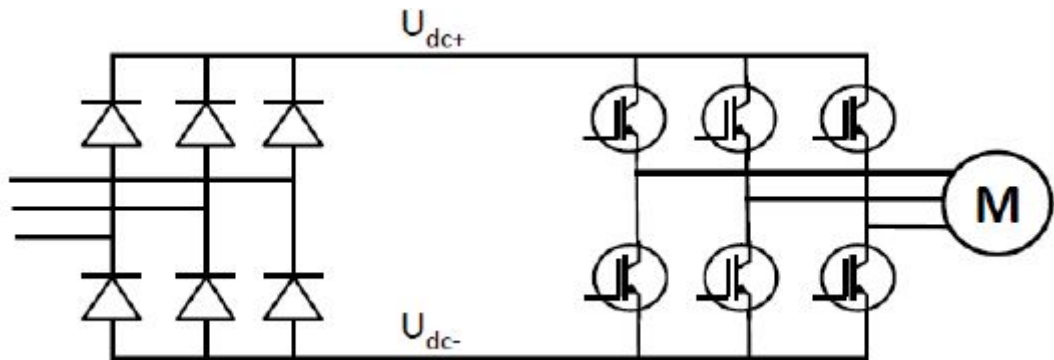
Kuva 1. Taajuusmuuttajan periaatekaavio. /1, s. 11/.

2.1 Taajuusmuuttaja tyypit

Taajuusmuuttajatyyppejä on kahdenlaisia: epäsuoria taajuusmuuttajia ja suoria taajuusmuuttajia. Epäsuoria taajuusmuuttajia ovat jännitevälipiirillinen (VSI; Voltage Source Inverter) ja virtavälipiirillinen (CSI; Current Source Inverter). Jännitevälipiirillisessä muuttajassa ohjataan jännitettä ja virtavälipiirissä ohjataan virtaa. Suorataajuusmuuttajissa tuleva jännite pilkotaan matalataajuisesti lähtöjännitteeksi, esimerkiksi syklokonvertteri. Epäsuorissa taajuusmuuttajissa voidaan moottoria pyörittää yli nimellisa nopeuden kun vastaavasti suoralla muuttajalla voidaan pyörittää ainoastaan alle nimellisa nopeuden. Yleisimmin käytetty taajuusmuuttajatyyppi on jännitevälipiirillinen. Tässä työssä käsitellään vain jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa. /2, s. 50/.

2.2 Taajuusmuuttajan toiminta

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan voidaan jakaa kolmeen pääkomponenttiin: Tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan. Kuvassa 2 nähdään pääkomponentit.

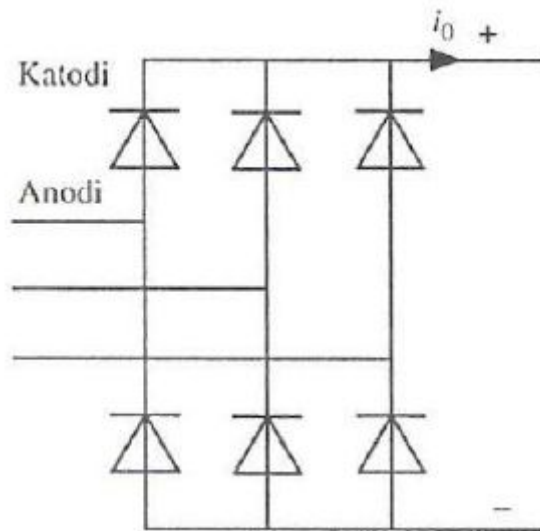


Kuva 2. Taajuusmuuttajan pääpiirikaavio.

Tasasuuntaaja muuntaa verkosta tulevan kolmivaiheisen vaihtojännitteen tasajännitteeksi välipiirille. Välipiiri toimii energialähteenä vaihtosuuntaajalle, josta vaihtosuuntaaja muuntaa tasajännitteen takaisin kolmivaiheiseksi vaihtojännitteeksi.

2.2.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja muuntaa verkosta tulevan vaihtojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Komponentteina käytetään diodeja, tyristoreita, tehotransistoreita tai diodien ja tyristorien yhdistelmiä. Nykyään käytetään paljon tehotransistoreita, kuten esimerkiksi (IGBT; Insulated Gate Bipolar Transistor) transistoreja niiden hyvän ohjattavuuden takia, mutta diodisillat ovat vielä yleisimpiä käytettäviä komponentteja. Tehotransistoreita käytetään tasasuuntaajassa siitä syystä, että teho voi liikkua molempiin suuntiin ohjattavuuden takia. Diodia käyttäessä teho voi vain liikkua verkosta moottorille päin ja tällöin esimerkiksi moottorin tuottamaa jarrutusenergiaa ei voida käyttää hyväksi samalla tavalla kuin tehotransistoreja käyttämällä. Lisäksi tehotransistoreita käyttämällä saadaan tasajännite entistä tasaisemmaksi kuin diodeja käyttäen. Kuva 3 (ks. seur. s.) havainnollistaa tasasuuntaajan diodisiltaa.



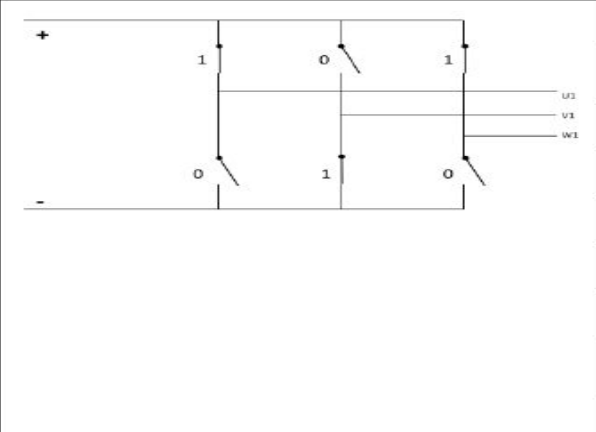
Kuva 3. Diodisillalla toteutettu kuusi pulssinen tasasuuntaaja. /2, s. 40-42/.

2.2.2 Välipiiri

Välipiirin tarkoituksena on toimia energialähteenä vaihtosuuntaajalle sekä erottaa tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja toisistaan. Välipiirissä on kondensaattori joka tasoittaa tasasuuntaajasta tulevan sykkivän tasajännitteen entistä tasaisemmaksi. Lisäksi se toimii tasasuuntaajan pienenä energiavarastona. Kondensaattorin lisäksi välipiiriin on mahdollista asentaa kela eli kuristin, jonka tarkoituksena on pienentää mahdollisia virtapiikkejä. /2, s. 48/.

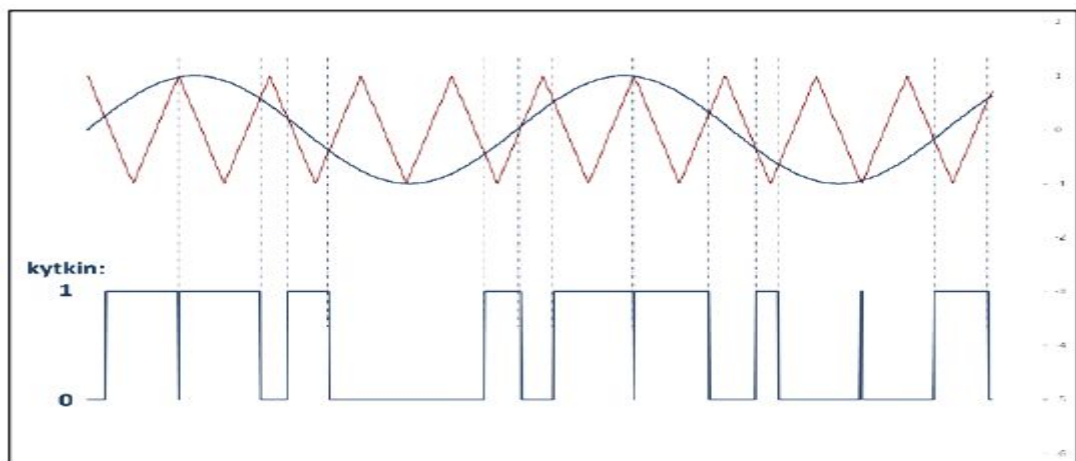
2.2.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja vaihtaa välipiiristä tulevan tasajännitteen halutuksi vaihtojännitteeksi. Haluttu vaihtojännite saadaan aikaan pulssinleveysmoduloinnilla (PWM; Pulse Width Modulation) tai pulssinamplitudimoduloinnilla (PAM; Pulse Amplitude Modulation), joista yleisempi on pulssinleveysmodulointi. Pulssinamplitudimoduloinnin toiminta perustuu siihen, että pulssin leveys ei muutu, mutta amplitudia säädetään kokoajan. Vastaavasti pulssileveysmoduloinnin toiminta perustuu pulssinleveyden ohjaamiseen, jossa amplitudi on koko ajan vakio. Pulssinleveydenmoduloinnilla ohjataan vaihtosuuntaajan kytkimiä erilaisilla kytkinyhdistelmillä, jotta saadaan aikaan mahdollisen sinimuotoinen käyrä. Modulaation toiminta periaatetta on hyvä havainnollistaa sinikolmiovertailulla. Kuvassa 4 (ks. seur. s.) esitetään kaikki mahdolliset kytkinvariaatiot.

	U_{1+}	V_{1+}	W_{1+}
	1	0	1
	1	1	0
	0	1	1
	1	0	0
	0	1	0
	0	0	1
	1	1	1
	0	0	0

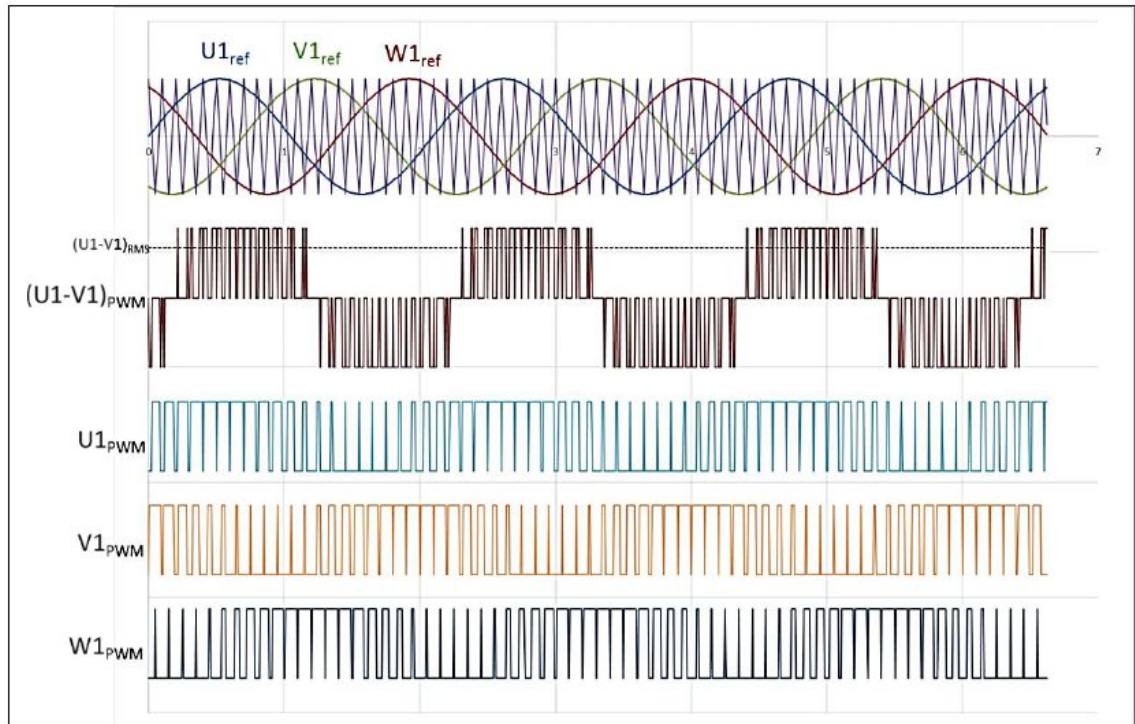
Kuva 4. Vaihtosuuntaajan eri kytkinkombinaatiot /3/.

Sinikolmiovertailu tapahtumassa tapahtumasarjaan luodaan halutun taajuinen vaihtojännite, joka on modulointiaalto, jota vertaillaan kolmioaaltoon. Kuten kuvassa 5 voidaan havaita.



Kuva 5. Sinikolmiovertailu /3/.

Aina kun kolmioaalto on pienempi kuin modulointiaalto, kytkin on kiinni asennossa 1, jolloin tuotetaan pulssi moottorille. Moduloinnin voi myös toteuttaa päinvastoin. Kolmi-vaiheinen pulssileveysmodulointi saadaan aikaiseksi samalla tavalla kuin kuvassa 5, mutta yhden modulointiaallon sijasta käytetään kolmea ja 120° asteen vaihe-erolla. Moottorille saadaan kuvan 6 (ks. seur. s.) mukaiset jännitepulssit



Kuva 6. Kolmivaiheinen sinikolmio vertailu ja jokaisen vaiheen jännitepulsit /3/.

Vaikka jännite ei olekaan sinimuotoista, sen sijaan moottorille menevä virta on lähes sinimuotoista. Jos kolmioaaltoa tihentää entisestään eli kytkimien kytkentätaajuutta kasvatetaan, saadaan entistä sinimuotoisempaa virtaa aikaiseksi. /3/

2.3 Taajuusmuuttajan säätötavat

Pääasiassa taajuusmuuttajia säädetään kolmella eri tavalla: skalaari eli taajuusohjaus, vektori-ohjaus tai suoramomentinsäätö. Skalaari-ohjaus on halvempi ja yksinkertaisempi säätötapa kuin vektori- tai suoramomenttisäätö. Vektori- ja suoramomenttisäätö ovat huomattavasti monimutkaisempia ja kehittyneempiä säätötapoja ja tästä syystä kalliimpia.

2.3.1 Skalaari-ohjaus ja -säätö

Skalaari-ohjauksessa oikosulkumoottorin säätö tapahtuu taajuusohjetta muuttamalla. Skalaari-ohjauksessa ei tarvita varsinaista takaisinkytkentää eikä ohjauksessa ole varsinaista nopeuden- tai vääntömomentinsäätöä. Oikosulkumoottorikäytön nopeuden tarkkuuden määrää jättämän suuruus. Yleisesti oikosulkumoottorin jättämä on hyvin

pieni, tällöin pyörimisnopeuden virhe on hyvin pieni. Virheen ollessa pieni ohjaustapa soveltuu hyvin moniin käyttökohteisiin, joihin ei tarvita tarkkaa ohjausta.

Taajuusohjetta muuttamalla muutetaan moottorille menevää taajuutta, jolloin myös jännite muuttuu. Jännite muuttuu lineaarisesti samassa suhteessa taajuuden ja pyörimisnopeuden kanssa aina moottorin jännitteennimellisarvoon saakka. Kun moottori pyörii 0-nimellispyörimisnopeuden välillä, taajuuden ja jännitteen välinen suhde on aina vakio. Kaavasta 1 voimme huomata jännitteen ja taajuuden suhde.

$$U_s = (R_s + jX_{\sigma,s})i_s + k\phi_m f_s \quad (1)$$

U_s on staattorin jännite

R_s on staattorin resistanssi

$jX_{\sigma,s}$ on staattorin reaktanssi

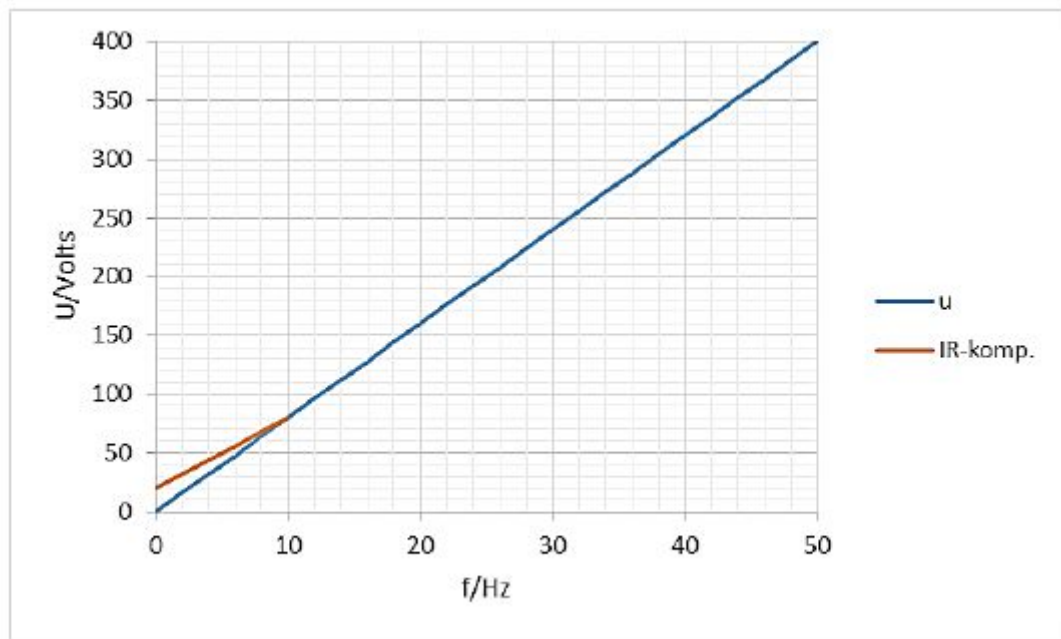
i_s on staattorin virta

k on moottorivakio

ϕ_m on moottorin magnetointi

f_s on staattorin taajuus

Skalaariohjaus pyrkii pitämään moottorin magnetoinnin vakiona jokaisella taajuuden eri arvolla ja samalla moottorin oma kerroin on vakio. Lausekkeessa staattorin jännitehäviön oletetaan olevan staattorin liikejännitteen suuruinen, joten käytännössä resistiivisen osan vaikutus on pieni suurilla kierrosnopeuksilla. Näin ollen resistiivisen termin voidaan myös olettaa olevan vakio. Ainoa muuttuja on taajuus ja sen muuttuessa jännite muuttuu myös samassa suhteessa kuten myös moottorin pyörimisnopeus. Kuva 7 (ks. seur. s.) selkeyttää tapahtumaa paremmin.



Kuva 7. Jännitteen ja taajuuden suhde skalaariohjauksessa /3/.

Mikäli taajuus ylittää 50Hz, jännite ei enää kasva vaan jää nimellisarvoonsa, tällöin ollaan ns. kentänheikennysalueella. Kentänheikennysalueella moottori pyörii yli nimellinopeuden ja moottorin magnetointia ei voida enää pitää tasaisena moottorin alimagnetoitumisen vuoksi. Alimagnetoituminen alentaa moottorin momentintuotto kykyä. Taajuuden ja jännitteen suhde ei ole myöskään lineaarinen, kun taajuus lähenee nolaa. Kaavan 1 (ks. ed. s.) staattorin resistanssin alkaa vaikuttaa jännitteen ja taajuuden suhteeseen matalilla pyörimisnopeuksilla. Suhde voidaan kompensoida nostamalla jännitteen tasoa matalilla kierroksilla käyttäen IR-kompensointia. /3/

Skalaarisäätö on taajuussäätö, joka muodostuu nopeussäätäjän ja vääntömomentinsäätäjän kaskadikytkennästä. Skalaariohjaus sekä skalaarisäätö perustuvat moottorin stabiilin tilan tuntemiseen. Skalaariohjaus muuttuu skalaarisäädöksi, mikäli lisätään takaisinkytkentätieto moottorin pyörimisnopeudesta ja virrasta. Oikosulkukoneen vääntömomentin ohjaus saadaan aikaiseksi vääntömomentin ja jättämän välisestä riippuvuudesta. Moottorin aikaansaama momentti on suoraan verrannollinen jättämätaajuuteen, johon voidaan vaikuttaa syöttötaajuuden askelmaisella muutoksella tai kuormitusta muuttamalla. Skalaarisäätö pystyy toteuttamaan momentinsäätöä arvioimalla moottorin pätövirtaa. Pätövirta on suoraan verrannollinen momenttiin, joten momentille saadaan aikaiseksi arvio momentinoloarvosta. Skalaarisäätö ei ehdi reagoida nopeisiin momentin muutoksiin vaan moottorin uusi stabiilitila muodostuu vähitellen. /4, s. 84/

2.3.2 Vektorisäätö

Vektorisäätö on hyvä moottoreissa, joissa saattaa tapahtua äkillisiä muutoksia moottorin kuormituksessa, jolloin tarvittava vääntömomentti muuttuu nopeasti. Tällöin moottorin ja kuormituksen dynamiikka on tunnettava. Vektorisäädössä käytetään kaksiakselimallia, joka voidaan toteuttaa staattori- tai roottorikoordinaatistoissa. Moottorista muodostuva vääntömomentti on päävuon ja roottorivirran vektoritulo ja roottorivirta muodostaa roottorivuon. Mikäli vääntävää momenttia halutaan säätää, roottorivuota pyritään kontrolloimaan.

Vektorisäädön sisäistää vääntömomentinsäädön ja sitä ohjaavasta pyörimisnopeuden säädöstä. Vektorisäädön aikaansaamiseksi tarvitaan mittatietoa moottorivirrasta ja moottorinpyörimisnopeudesta. Mitatut tiedot syötetään matemaattisiin koordinaatistoihin ja lasketun moottorimallin avulla lasketaan säätöön tarvittavat ohjaussuureet. Vektorisäädössä moottorista mitattu virta jaetaan pitkittäiseen ja poikittaiseen komponentti koordinaatistoon. Pitkittäinen virtakomponentti muodostaa koneen magnetoinnin, josta saadaan ulos käämivuon oloarvo. Poikittainen virtakomponentti muodostaa koneen vääntömomentin ja siitä saadaan koneelle vääntömomentin oloarvo. Tällöin voidaan säätää vääntömomenttia ja magnetointia erikseen.

Vektorisäätö kykenee pitämään koneen sähkömagneettisentilan paremmin hallussa kuin skalaarisäätö, ja tällöin se pystyy reagoimaan paljon nopeammin kuormitusmuutoksiin. /4, s. 85-87/.

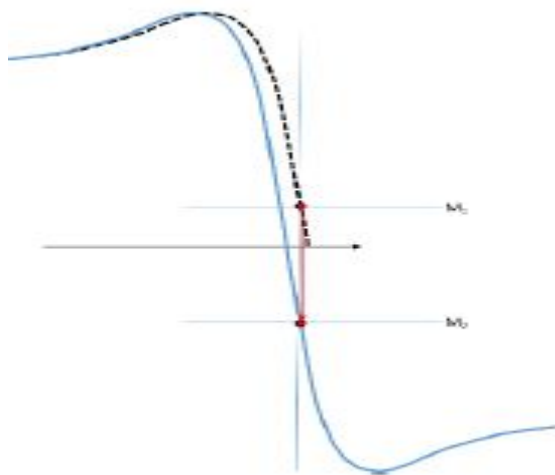
2.3.3 Suora vääntömomentin säätö DTC (Direct Torque Control)

Suoran vääntömomentin säädössä säädetään suoraan moottorin käämivuota ja tätä kautta vääntömomenttia. Tällä säätömenetelmällä kuten myös aiemmin mainitulla vektorisäädöllä päästään hyvin lähelle todellisiin suorituskäytöihin vaativissakin käyttökohteissa. Tällöin voidaan reagoida ja ohjata tarkasti sähkömoottoria suurissa kuormituksissa ja nopeissa kuormituksen muutoksissa.

Suora vääntömomentinsäätö koostuu kahdesta osasta, nopeuden säätöpiiristä ja vääntömomentin säätöpiiristä. Kuva 9 (ks. seur. s.) esittää periaatekuvan momentin säädöstä.

2.4 Taajuusmuuttajalla moottorin jarruttaminen

Taajuusmuuttajalla ohjattu moottori voi toimia hetkellisesti generaattorina (kuva 11.). Generaattorina toimimiseen syöttötaajuuden on alennettava riittävästi, tällöin generoitu teho alkaa muodostaa jarruttavaa momenttia moottorin akselille. Hetkellistä generoituvaa ominaisuutta voidaan hyödyntää moottorin pyörimisnopeutta hidastettaessa, esimerkiksi jos halutaan syöttää osa tehoa takaisin verkkoon. Moottorin jarruttaminen taajuusmuuttajalla voidaan toteuttaa erilaisilla tavoilla. Ajatuksena on kuitenkin generoituvan tehon kuluttaminen jossain muodossa tai siirtää teho takaisin verkkoon.



Kuva 11. Hetki jolloin moottori alkaa jarrutustilanteessa käydä generaattorina [3].

2.4.1 Vuojarrutus

Taajuusmuuttajalla voidaan luoda jarruttavaa tehoa vuojarrutuksella. Vuojarrutuksessa muodostuva jarruttava teho saadaan aikaiseksi sitten, että taajuusmuuttaja kierrättää generaattorivirrat moottorissa. Tämä teho kulutetaan moottorin häviöillä. Moottorin hyötysuhdetta saadaan huononnettua moottoria ylimagnetoimalla, jolloin jarrutusteho kulutetaan pois rautasydämessä lämpönä.

Vuojarrutus on erityisesti toimiva vaihtoehto pienitehoisilla moottoreilla, joissa resistanssit ovat suhteellisen suuria moottoriin nähden. Näin ollen moottorin hyötysuhde huononee suhteessa paremmin kuin suuritehoisilla. Jarrutustapa soveltuu parhaiten käyttökohteisiin, joissa jarrutuksen tarve on vähäinen. Vuojarrutuksen etuna on se, että

uusia komponentteja ei tarvitse asentaa, ja jarrutuksen ohjaus toteutetaan taajuusmuuttajalla. Lisäksi jarrutus on hallittua. Vuojaarrutuksen huonona puolena on moottorin altistuminen lämpörasitukselle. /3; 4 s. 47/.

2.4.2 DC-virtajarrutus

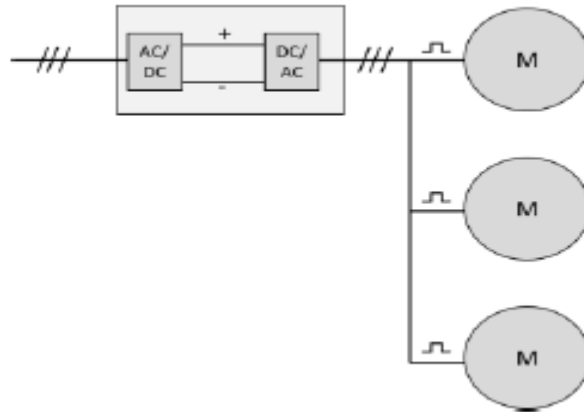
DC-virtajarrutuksessa myös huononnetaan moottorin hyötysuhdetta syöttämällä virtaa moottorille ja saadaan hävitetyksi jarruteho moottoriin. DC-virtajarrutuksessa moottori toimii pyörrevirtajarrun periaatteella. Jarrutustavan huonoina puolina voidaan pitää moottorin altistumista ylimääräiselle lämpörasitukselle ja samalla menetetään moottorin tarkka ohjattavuus. /4, s. 47/.

2.4.3 Jarruvastus/jarrukatkoja

Jos jarruttavaa tehoa ei kuluteta moottorin häviöissä, energia siirtyy vaihtosuuntaajan kautta jännitevälipiirille. Energian siirryttyä välipiirille, tarvitaan välipiiriin erillinen jarrukatkoja ja vastus, jotta energian nostattama jännitetaso ei aiheuttaisi mitään vahinkoa taajuusmuuttajalle. Jarrukatkoja on kytkin, joka ohjaa jarruttavan tehon välipiirissä vastukselle. Jarrukatkoja toimii sitten, että kun välipiirissä jännite nousee riittävän korkealle, se kytkeytyy kiinni ja ohjaa tehon vastukselle. Lopulta jarruvastus kuluttaa jarrutus tehon pois lämpötehona. Jarruvastuksen etuina ovat kohtuullisen edullinen ratkaisu, yksinkertainen ja tehokas jarrutusmenetelmä. Huonoina puolina voidaan todeta, että jarruttava teho menee hukkaan, ellei sitä lämpötehoa hyödynnetä esimerkiksi lämmönvaihtimella. Lisäksi vastus vaatii oman tilansa ja komponenttinsa. /3; 4, s. 47-48/.

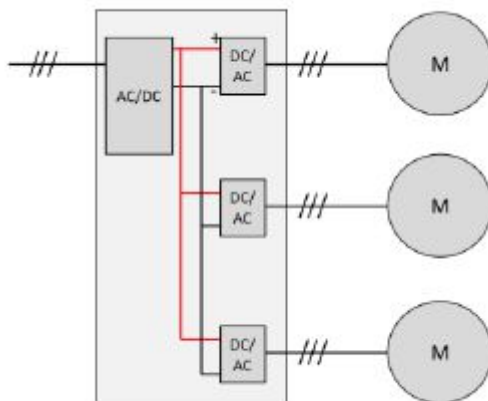
2.4.4 Monimoottorikäyttö

Eräs tapa on monimoottorikäyttö. Ajatuksena on ohjata useaa moottoria ainoastaan yhdellä taajuusmuuttajalla kuvan 12 (ks. seur. s.) mukaisesti.



Kuva 12. Havainnollistava kuva monimoottorikäytöstä. /3/

Kuvassa 12 useat moottorit on kytketty saman vaihtosuuntaajan taakse. Tällöin säästetään kustannuksissa, kun yhdellä taajuusmuuttajalla voidaan ohjata useaa moottoria. Monipuolisempi ja kenties kustannustehokkaampi vaihtoehto on käyttää kuvan 13 mukaista monimoottorikäyttö tapaa.

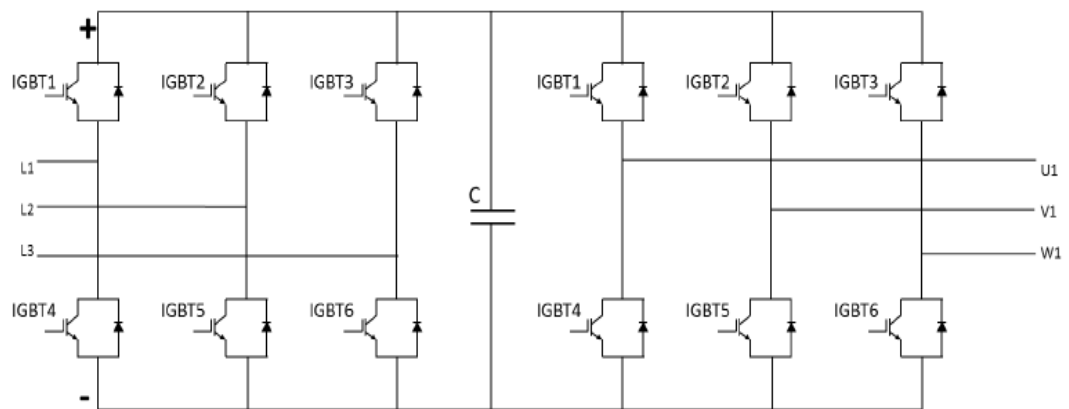


Kuva 13. Monimoottorikäyttö yhdellä ja samalla tasasuuntaajalla. /3/.

Erona aikaisempaan tapaan on se, että yhteisen vaihtosuuntaajan sijasta käytetään yhteistä tasasuuntaajaa, jolloin esimerkiksi yhden moottorin muodostama jarrutus energia voidaan siirtää toisiin moottoreihin, jotka ovat saman tasasuuntaajan takana tai takaisin verkkoon.

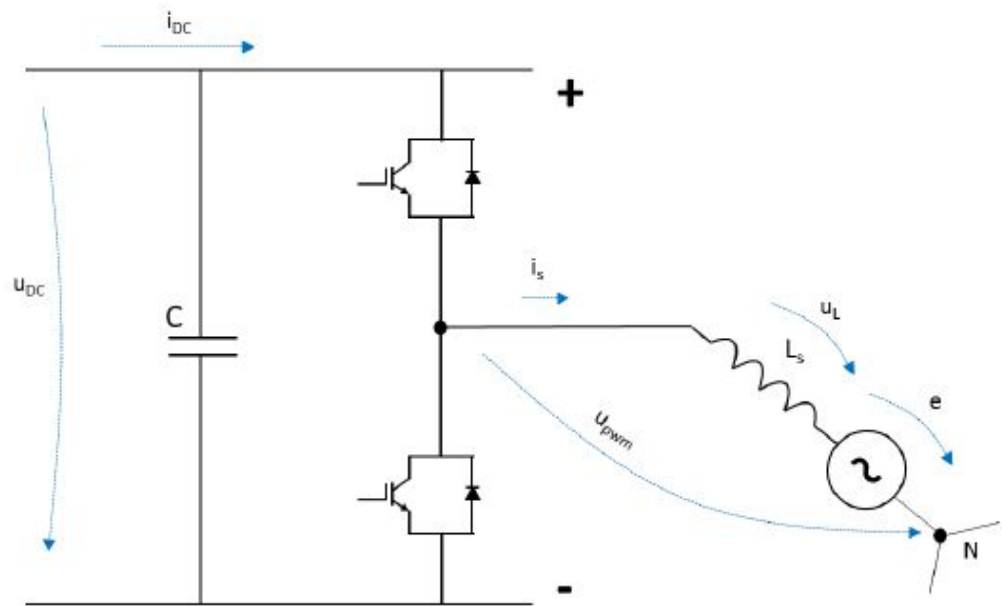
2.4.5 Verkkoon jarrutus

Taajuusmuuttajan tasasuuntaaja vaatii ohjatut IGBT-vaihtosuuntaajatransistorit diodisilan tilalle samoin myös vaihtosuuntaus puolelle. Kyseiset komponentit voivat toimia tasasuuntaajana tai vaihtosuuntaajana. Tällöin verkolta tuleva energia voidaan muuttaa moottorille halutuksi sähkötehoksi aivan normaalisti, mutta moottorilta muodostuva jarrutusenergia voidaan myös siirtää takaisin verkkoon. Toisin sanoen teho voi liikkua molempiin suuntiin. Tällöin vaaditaan kuvan 14 mukainen muuttaja.



Kuva 14. Verkkoon jarruttavan taajuusmuuttajan kytkentäkuva /3/.

Tarkasteltaessa kuvan 15 (ks. seur. s.) mukaista kytkentää, voidaan tutkia välipiirin jälkeistä yhden vaiheen IGBT ohjattua transistoria, jolla voidaan ohjata tehon suuntaa modulointijännitteen ja lähdejännitteen potentiaali-erolla.



Kuva 15. Vaihtosuuntaajan yhden vaiheen tarkastelu /3/.

Moottorin pyöriessä joko normaalisti tai generoivassa tilassa, moottorin sähkömotorinen voima eli lähdejännite on kaavan 2 mukainen.

$$E = k\phi_m f_s \quad (2)$$

E on moottorin sähkömotorinen voima

k on moottorin vakio

ϕ_m on moottorin magnetointi

f_s on moottorin taajuus

Vastaavasti moottorien käämien yli menevä jännite on kaavan 3 mukainen

$$U_L = j2\pi f L_s i_s \quad (3)$$

U_L on kelan jännite

$j2\pi f L_s$ on kelan induktanssi

i_s on vaihevirta

Modulointijännite U_{PWM} saadaan aikaiseksi muuttamalla kaava 2 ja kaavaksi 4 3 jännitteenjakoa käyttäen.

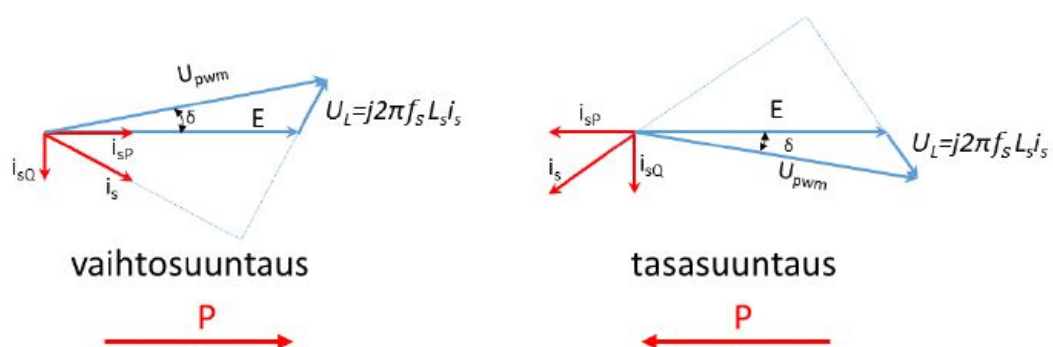
$$U_{PWM} = U_L + E \quad (4)$$

Lähdejännitteen ja modulointijännitteen potentiaali-ero on kaavan 5 mukainen.

$$U_L = U_{PMW} - E \quad (5)$$

Mikäli taajuus pysyy vakiona, tällöin sähkömotorinen voima pysyy myös vakiona, jolloin vaihevirta määräytyy kelan induktanssin ja modulointijännitteen ja lähdejännitteen jännite-eron mukaan. Modulointijännitettä voidaan ohjata esimerkiksi pulssileveysmoduloinnilla (ks. 2.2.3.), jolloin modulointijännitettä ohjaamalla voidaan vaikuttaa tehon siirtymisen suuntaan.

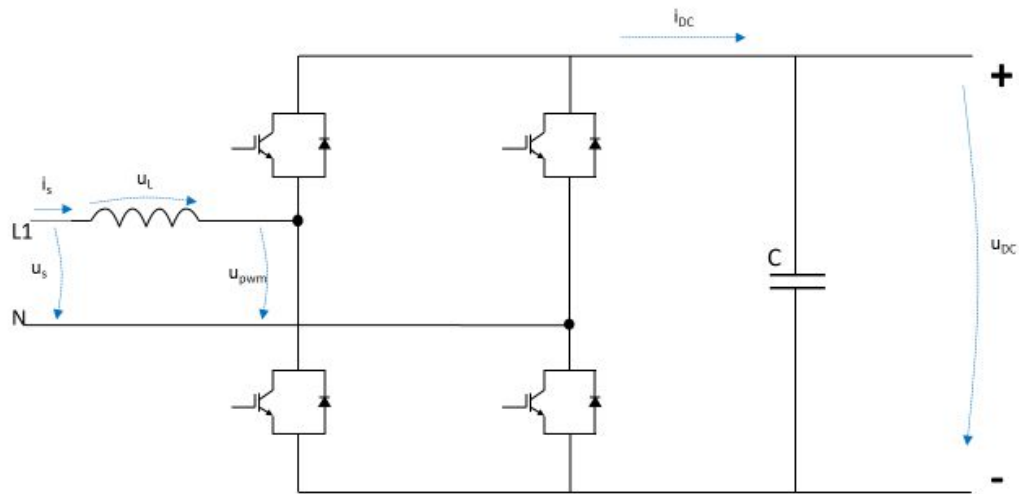
Kun ohjattu modulointijännite on lähdejännitettä edellä, transistorit toimivat vaihtosuuntaajana, jolloin teho siirtyy moottorille. Vastaavasti, kun ohjattu jännite on jäljessä lähdejännitettä nähden, kytkentä toimii tasasuuntaajana. Tällöin moottori toimii generoituvassa tilassa, jolloin teho siirtyy välipiirille. Kuva 16 havainnollistaa tehon siirtymistä vaihtosuuntaajassa.



Kuva 16. IGBT transistorin toiminta vaihtosuuntaajan puolella /3/.

Moottorin toimiessa generoivassa tilassa, jolloin jarrutusenergia on siirretty jo välipiirille. Jotta tämä kyseinen energia voitaisiin vaihtosuunnata takaisin verkkoon, tähän tarvi-

taan verkkovaihtosuuntaaja ja tarkastellaan asiaa jälleen yksivaiheisena kuvan 17 mukaisesti.

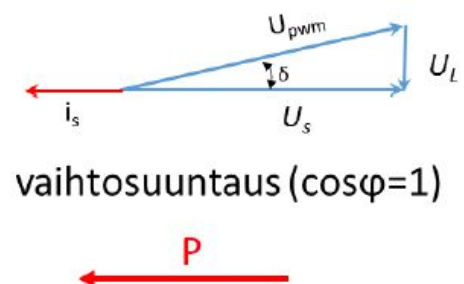
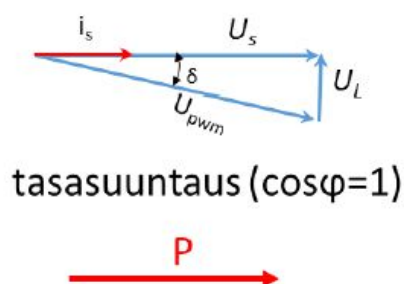


Kuva 17. Verkkoon jarruttavan muuttajan verkonpuoleiset IGBT transistorit /3/.

Verkon puolelle on lisätty kuristin, joka tasoittaa kytkentätaajuisia virta-aaltoisuuksia tasaisimmiksi, jolloin saadaan suodatettua kytkimistä aiheutuvat yliaallot pois. Kuvan 17 avulla saadaan kaava 7.

$$U_s = U_L + U_{PMW} = j2\pi f L i_s + U_{PMW} \quad (7)$$

Verkkovaihtosuuntaajan U_s syöttämää jännitettä verkolle päin saadaan aikaiseksi ohjaamalla U_{PMW} vaihekulmaa. Kuva 18 voidaan huomata tehon siirtymistä tasasuuntauspuolella.



Kuva 18. IGBT transistorin toiminta tasasuuntaajan puolella /3/.

Verkkoon jarruttaminen tarvitsee aina säätäkseen mittatietoa välipiirin tasajännitteestä $U_{DC}(t)$ ja verkosta tulevan jännitteen $U_s(t)$ arvoista tietyllä ajan hetkellä. Tällöin välipiirissä oleva jarrutusenergia voidaan moduloida oikein, jotta jännite olisi mahdollisimman sinimuotoista. /3/

2.4.6 Taajuusmuuttajasta aiheutuvat häiriöt eli yliaallot

Tavalliset oikosulkumoottorit eivät aiheuta isoja verkkohäiriötä, koska ne pyörivät melkein samalla taajuudella kuin verkon taajuus, eli ne ottavat verkosta lähes sinimuotoista virtaa. Vastaavasti taajuusmuuttajan tasasuuntaajat aiheuttavat häiriötä, koska ne eivät ota sinimuotoista virtaa verkosta. Tasasuuntaajista syntyviin yliaaltoihin vaikuttavat suuntaajakytkentä, kuormitusvirta, ja kuorma. Tasasuuntaajat synnyttävät parittomia yliaaltoja ja yliaallot eivät tee mitään työtä vaan lähinnä alentavat tehokerrointa ja aiheuttavat mekaanisia värähtelyjä. Tehokertoimen parantamiseksi tarvitaan joku komponentti suodattaa yliaallot pois. Suodattimena monesti toimii kuristin.

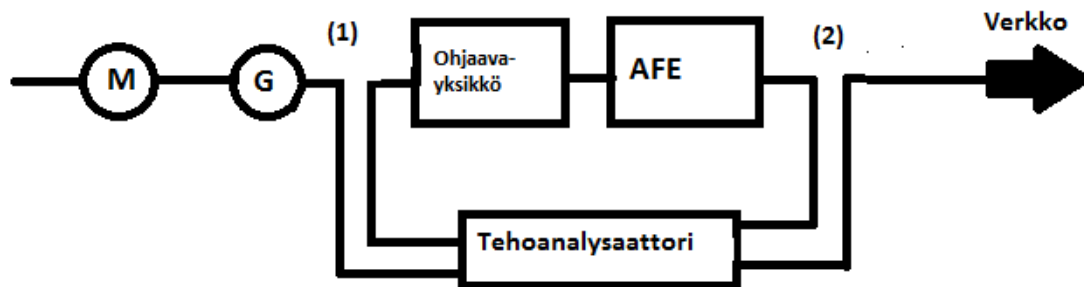
2.4.7 Taajuusmuuttajan hyötysuhde.

Taajuusmuuttaja on komponentti, jonka läpi kulkee tehoa joko verkolta moottoriin päin tai päinvastoin. Taajuusmuuttajan muodostaa häviöitä niin kuin kaikki sähköiset komponentit. Se teho, joka saapuu muuttajalle, ei ole täysin sama, joka lopulta päätyy moottorille. Kaikki komponentit tasasuuntaajassa välipiirissä ja vaihtosuuntaajassa muodostaa häviöitä. Periaatteessa häviö on varsin pientä, ja sen voi käytännössä ajatella olevan merkityksetöntä.

3 Mittauskytkennän esittely

Tässä työssä on tarkoituksena mitata generaattorissa muodostuvaa jarruttavaa tehoa. Jarrutuksessa muodostuva teho mitataan ennen taajuusmuuttajaa ja jälkeen taajuusmuuttajan. Tällöin voidaan mitata verkkoon päin työnnetty teho ja tästä saadaan lasketua hyötysuhde paljonko tehoa jää taajuusmuuttajalle. Tehona kiinnostaa pätöteho komponentti, koska kyseinen teho on se mekaaninen voima, jota voidaan hyödyntää. Mittaus suoritetaan eri kuormituksilla ja moottorin eri pyörimisnopeuksilla, jotta voidaan

tutkia muuttuuko hyötysuhde kun jarrutuksessa muodostuvaa tehoa syntyy enemmän. Mittauskytkentä on kuvan 19 mukainen.



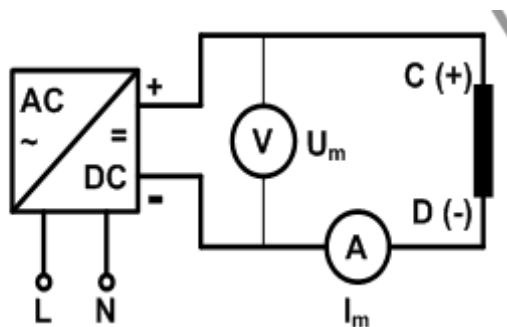
Kuva 19. Mittauskytkentä, jossa (1) tarkoittaa generaattorin ja ohjaavan taajuusmuuttajan välis-
tä mittauspistettä ja (2) tarkoittaa verkkoon päin menevää mittauspistettä.

Pyörittävänä voimana on tasavirtamoottori, jonka akselin toiseen päähän on kiinnitetty oikosulkumoottori, joka toimii generaattorina. Generaattorin muodostama teho siirretään tavalliseen taajuusmuuttajaan, johon on liitetty lisäksi AFE (AFE; Active Front End) yksikkö. Ilman AFE-yksikköä ei voida siirtää tehoa verkkoon ainakaan Vaconin taajuusmuuttajalla. Tehoanalysointilaite on kytketty ennen taajuusmuuttajaa ja AFE:n jälkeen, jolloin voidaan tutkia muodostuvan tehon ja verkkoon päin menevän tehon erotusta ja tästä päätellä hyötysuhde.

Moottorina toimii tasavirtakone, koska kyseisen moottorin pyörimisnopeutta voidaan muuttaa. Moottorina voitaisiin käyttää myös oikosulkumoottoria, mutta erilaisien nopeuksien aikaan saamiseksi tarvittaisiin erillinen taajuusmuuttaja. Kuormitusta voidaan muuttaa tavallisen taajuusmuuttajan avulla, johon on lisätty momenttivastetta säättävä potentiometri, jolla voidaan jarruttaa generaattoria ja saada aikaan jarruttavaa tehoa. Momenttivastetta voidaan säätää välillä 0,5 - (-100 %).

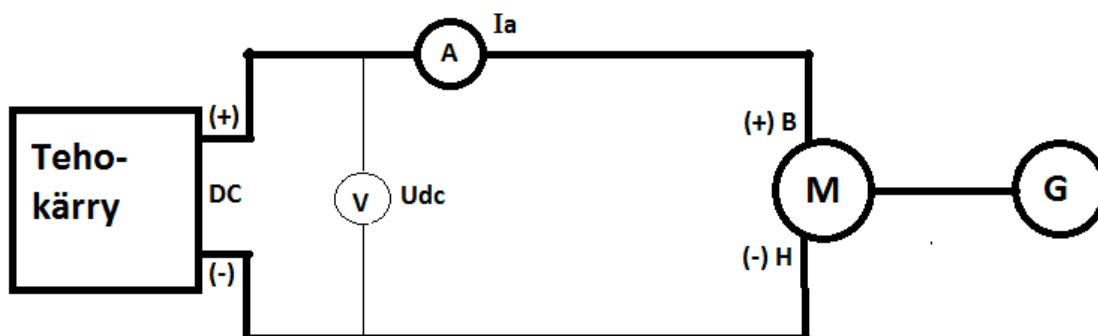
3.1 DC-kone

Ensin tarvitaan tasavirtamoottorin staattorille tasavirtaa magnetoitipiirillä, joka on kuvan 20 (ks. seur. s.) mukainen. Asetetaan tasavirta nimellisarvoon, jolloin saadaan staattori magnetoitua.



Kuva 20. Magnetointipiiri, jossa U_m on magnetointijännite ja I_m magnetointivirta. C (+) on positiivinen napa ja D(-) negatiivinen napa.

Seuraavaksi syötetään ankkuripiiriä tasasähköllä, jolloin staattorin ollessa magnetoituna, saadaan aikaan pyörimisliikettä moottorin akselilla. Ankkuripiiri on kuvan 21 mukainen. Ankkuripiirin tasasähkön suuruudella voidaan säätää moottorin akselin pyörimisnopeutta. Tasasähkön suuruutta voidaan muuttaa tehokärryn avulla.



Kuva 21. Ankkuripiiri, jossa U_{dc} on ankkuripiiriin jännite ja I_a on ankurivirta. B on plussa napa ja H on miinus napa.

3.2 Generaattori

Tasavirtakone pyörittää generaattoria, jolloin generaattori tuottaa tehoa taajuusmuuttajalle, josta se työnnetään verkkoon AFE:n avulla. Mikäli taajuusmuuttaja ei ole käynnissä tai jarruttavaa momenttia ei käytetä, generaattori pyörii tyhjäkäynnillä eikä tällöin synny jarruttavaa tehoa. Vastaavasti jos ohjaava taajuusmuuttaja on käynnissä ja momenttiohje on + 0,5 %, tällöin taajuusmuuttaja antaa lisää pyörimisnopeutta akselille.

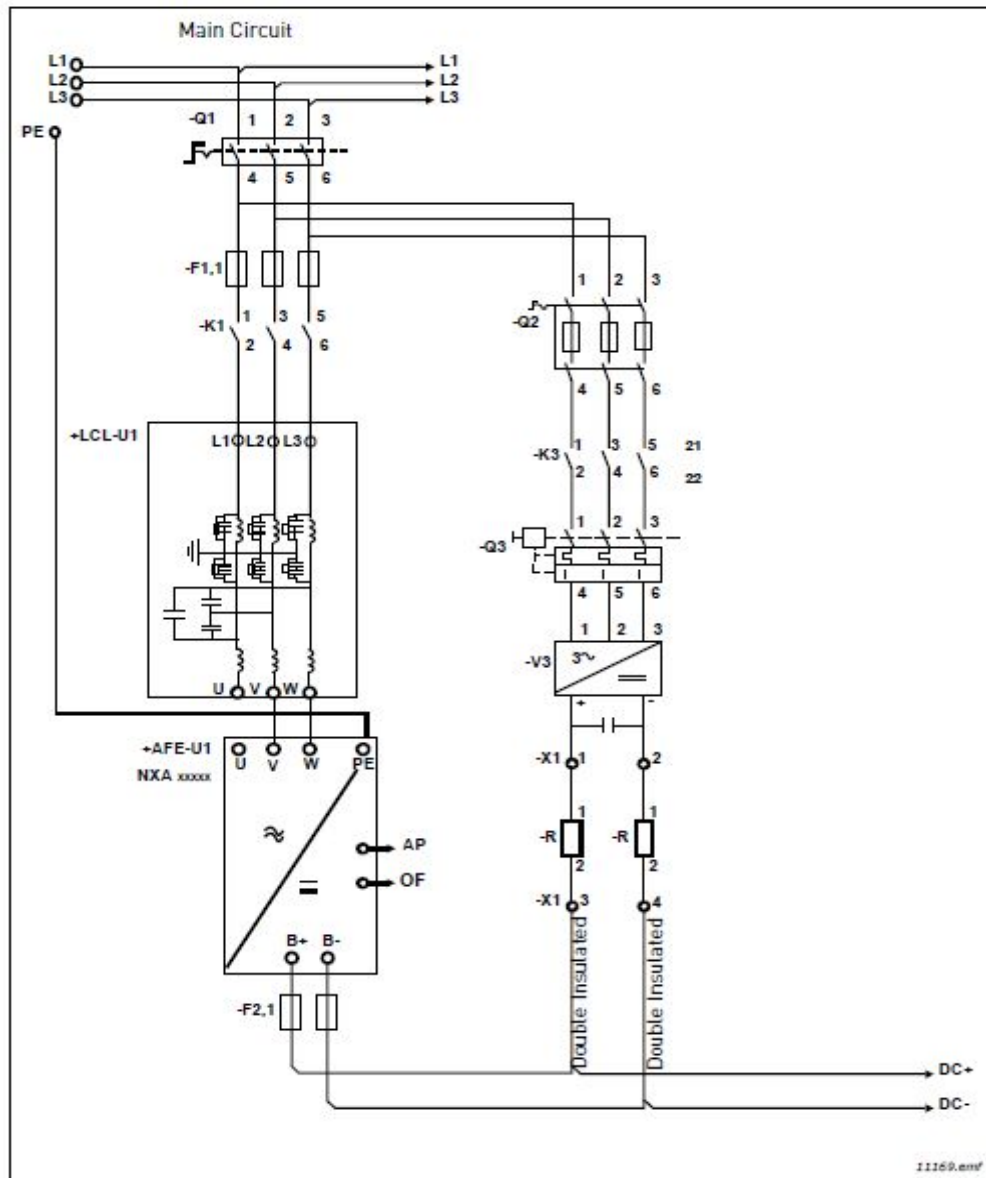
3.3 Tehoanalysaattori

Tehoanalysaattoriksi tarvitaan analysaattori, jossa on kuusi erillistä kanavaa, tällöin voidaan tutkia jokaista vaihetta ennen ja jälkeen taajuusmuuttajan. Ennen taajuusmuuttajaa valittiin kanavat 1 - 3, joka on mittauspiste 1 ja jälkeen 4 - 6, joka on mittauspiste 2 (ks. s. 19).

3.4 Taajuusmuuttaja ja AFE-yksikkö

Generaattorin jälkeen tulee taajuusmuuttaja Vacon (NXI), joka toimii ohjaavana yksikönä, johon on kytketty momenttivastetta säättävä potentiometri. Potentiometrillä voidaan jarruttaa generaattoria. Potentiometri on kytketty opt A1:een eli analogiseen lähtöön. Taajuusmuuttajaan on liitetty erillinen AFE-yksikkö (Vacon NXI). AFE ja taajuusmuuttaja ovat yhdistetty toisiinsa kahdella erillisellä kaapelilla, joka yhdistää komponenttien välipiirit toisiinsa. Ne ovat siis yhdistetty toisiinsa DC-linkillä. AFE yksikön ohjauspalikasta voidaan verkkoon päin menevää tehoa kompensoida, mutta siitä myöhemmin lisää.

Ennen kuin AFE-yksikkö käynnistetään, niin täytyy olla varmistettuna, että yksikön latauspiiri on asennettu ja oikea suodatin on kytketty verkon puolelle. Latauspiirin tarkoituksena on nostaa välipiirin jännitettä tarpeeksi, jotta AFE-yksikkö voidaan kytkeä verkkoon. Ilman latauspiiriä AFE-yksikkö ei välttämättä toimi oikein, joten latauspiiri tarvitaan.



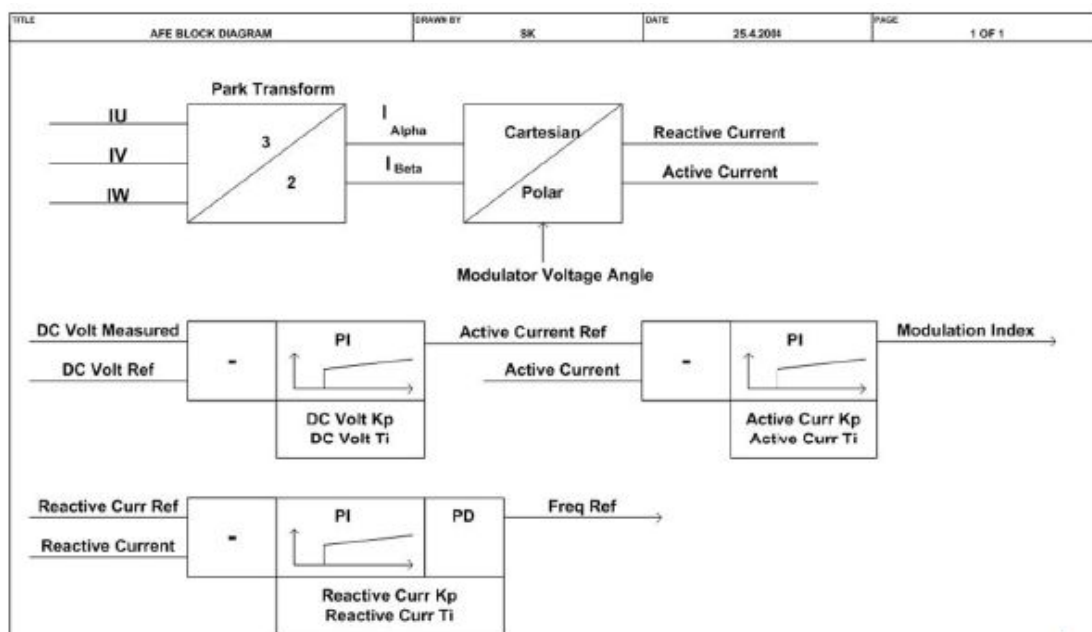
Kuva 22. AFE yksikön kytkentä kuva, jossa oikealla puolella on latauspiiri. /5/

Ennen kuin latausta ei olla tehty ja AFE-yksikköä ollaan käynnistämässä, tarvitaan kuvan 22 mukainen kytkentä. Aluksi kontaktori K1 on auki, tällä vältetään, että verkko-vaihtosuuntaaja ei saa verkosta jännitettä. Vastaavasti kontaktori K3 on kiinni, jolloin latauspiiriin kautta saadaan jännite välipiirille. Sitten kun välipiirissä jännite on tarpeeksi suuri, K3 aukeaa ja K1 menee kiinni, jolloin AFE-yksikkö on toimintakunnossa. AFE-yksikkö ohjaa näitä kontaktoreita R02-relekärkiä vaihtaen. Välipiiriin latautumisaika aika riippuu välipiiriin kapasitanssista ja latautuvien resistorien resistanssista. Mittauksessa käytetyssä AFE-yksikössä latautuminen tapahtuu hyvin nopeasti. Piiriin on kytketty

lisäksi LCL-suodatin, jonka tarkoituksena on suodattaa virran yliaaltoja pois, ja tätä kautta parantaa verkkoon työntyvän tehon hyötysuhdetta. /5/

3.5 AFE-yksikön toiminta

Jarruttavan taajuusmuuttajan toimintaa kuvaa hyvin lohkokaavio, joka on kuvan 23 mukainen.



Kuva 23. AFE toimintaa havainnollistava lohkokaavio. /6/

AFE toimii siten, että lasketaan kolmesta vaihevirrasta pätö- ja loisivirta komponentit eli aktiiviset ja reaktiiviset virrat. Kulkeeko virta generaattorille päin vai verkkoon päin, se riippuu modulaatio vaihejännitteestä. Vaihejännitteen moduloimiseen tarvitaan vielä modulointi indeksi ja se saadaan välipiirin DC-jännitteestä. AFE-yksikkö mittaa välipiirin tasajännitteen ja vertailee sitä referenssiarvon kanssa ja tästä saadaan sisääntulo tieto DC-säädölle. DC-säätö pyrkii asettamaan jännitteen referenssiarvon mukaiseksi käyttäen PI-ohjaus tapaa. Säädön jälkeen saadaan aktiivisen virran referenssiarvo, jota vertaillaan mitatun arvon kanssa. Tästä tehdään samat toimenpiteet ja saadaan luotua modulointi indeksi. Vastaavasti reaktiivisesta osuudesta saadaan taajuusreferenssiarvo.

PI-ohjauksissa voidaan manuaalisesti säätää esimerkiksi aktiivisen virran säädön vahvistusta ja integrointiaikaa generoivassa eli jarrutusvaiheessa. Aktiivisen virran vahvistus voidaan säätää parametrilla P.2.4.3 Active current kp ja integrointiaikaa P.2.4.4 Active current Ti. Nämä parametrisäädöt ovat jo sitten todellista hienosäätöä, joten näitä parametrisäädöksiä ei muutettu mittausten aikana. /6/.

4 Mittausten aloittaminen

Ajatuksena on mitata jarruttavan tehon hyötysuhdetta, jotta kokeesta saataisiin erilaisia tehoja aikaiseksi, tasavirtakoneen pyörimisnopeutta ja jarruttavaa momenttia pitää muunnella. Jarruttavaa tehoa mitataan viidellä eri momentin arvolla +0,5, -25, -50, -75, -100 %, josta jokaisesta jarruttavasta momentista valitaan neljä eri kierrosnopeutta 300, 900, 1200 ja 1445 rpm, joka on generaattorin nimellisnopeus. Jokaisessa kohdassa kirjataan kaikki tehoanalyysattorin näyttämät arvot ennen ja jälkeen taajuusmuuttajan ja lasketaan hyötysuhde. Lisäksi suoritetaan samat mittaukset uudestaan kompensoituna mahdollisimman hyvin. Generaattorin nimellisarvot ovat taulukon 2 mukaiset.

Taulukko 2 generaattorin nimellisarvot.

Jännite Y (V)	Kierrosnopeus (rpm)	Nimellisteho (kW)	Nimellisvirta (A)	cos(φ)
400	1445	3	6,3	0,79

Kun latauspiiri AFE:lle on todettu toimivaksi, voidaan käynnistää taajuusmuuttajat valmiustilaan. AFE-yksikkö ja ohjaavan taajuusmuuttajan ollessa valmiudessa, syötetään nimellisarvot molempiin yksiköihin. Ohjaavan yksikön nimellisarvoparametrit löytyvät parametrilistasta G2.1 otsikolla perusparametrit ja AFE-yksikön nimellisarvoparametrit löytyvät myös parametrilistasta G2.1. AFE yksikön perusparametrit ovat hieman erilaiset kuin normaaleissa taajuusmuuttajissa. Taulukossa 3 on esillä perusparametrilista tunnuksineen ja selityksineen (ks. seur. s.).

Taulukko 3 perusparametrilista AFE yksikössä. /6/

Parametri numerot	Parametri	Arvo	Selitys
P 2.1.1	Rated linevoltage	400 V	Asettaa jännitteen halutuksi kun jarruttavaa energiaa työnnetään verkkoon päin.
P 2.1.2	DC voltagerference	110,00 %	Asettaa DC jännite referenssin nimelliseen DC jännitteeseen ja jarruttavassa käytössä se pitää se kyseisellä tasolla.
P 2.1.3	Virtaraja	6,3 A	Täytyy asettaa nimellisvirran suuruiseksi, tällöin se suojellee laitteita liiallisilta virroilta.
P 2.1.4	Start/stop function	Auto	Tällä voidaan asettaa miten jarrutus tapahtuu. Joko käsikäytöllä tai käyntiluvalla (normal) tai automaattisesti. Eli jos välipiirissä havaitaan jarruttaa energiaa, niin se siirtää energian verkkoon ja loppuu kunnes energiat on loppu välipiiristä.
P 2.1.5	Autostop level	10 %	Kunnes aktiivisen virran osuus ylittää tietyn arvon, niin silloin jarrutus energian siirto loppuu.

Perusparametreista virtaraja-arvo oli ainoa parametri, jota muutettiin. Se täytyy asettaa sopivaksi jotta suojaukset toimivat oikein. Parametri Autostop Level muuttaminen ei vaikuta mitenkään tehollisarvoihin. Todennäköisesti mittauksissa käytetty generaattori oli nimellisarvoiltaan liian pieni taajuusmuuttaja jarrutuskäytölle, sen takia Autostop Level parametri ei vaikuttanut tuloksiin. Taajuusmuuttajat voivat toimia korkeintaan 16 A suuruisissa moottoreissa.

Kunnes kaikki parametrit ovat asetettu, voidaan käynnistää tasavirtamoottori ja syöttämällä ankkuriipiiriä sen verran, että saadaan haluttu pyörimisnopeus. Pyörimisnopeus mitattiin akselilta käyttäen takometriä. Kunnes akseli pyörii halutulla nopeudella, voidaan käynnistää ohjaava ja AFE taajuusmuuttajat start nappuloista, jotka löytyvät ohjauspalikoista. Kun ohjaavayksikkö lähtee toimimaan, taajuusmuuttaja antaa lisää vauhtia generaattorin akselille, koska momenttiohje alussa oli + 0,5 % ja AFE-yksikkö on päällä, mutta ei tee mitään.

5 Mittaustulokset

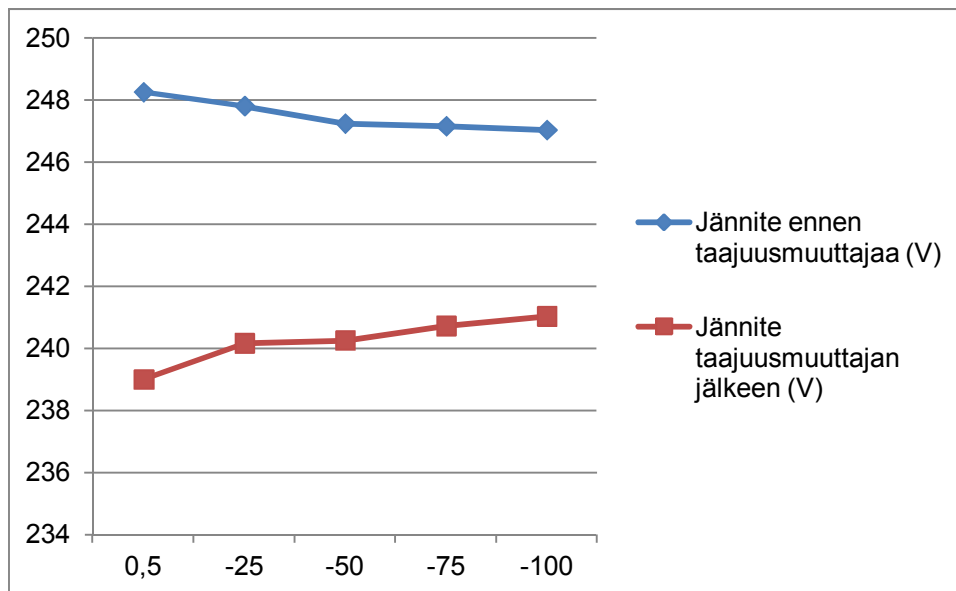
Työssä tehollisarvot esitetään tehoanalysaattorista saaduista arvoista, josta jokaisesta on piirretty kuvakäyrät. Tehollisarvot ovat mitattu keskiarvoina eikä vaihekohtaisesti. Mittausten aikana todettiin, että jokainen vaihe toimi symmetrisesti. Näin ollen tehollisarvot mitattiin koko työn aikana keskiarvallisesti.

5.1 Tehollisarvojen analysointi

Käyrät kuvaavat tehollisarvojen muutosta eri momenttiohjeen arvoilla tietyssä kierrosnopeudessa. Vaaka-akselilla on momenttiohjeen arvo ja pystyakselilla tehollisarvo, jota tarkastellaan. Käyräkuviissa tehollisarvo ennen taajuusmuuttajaa tarkoittaa generaattorin ja ohjaavan yksikön välistä mittauspistettä ja jälkeen taajuusmuuttajan tarkoittaa vastaavasti verkkoon päin menevää mittauspistettä. Liitteestä 1 löytyvät kaikki tehoanalysaattorista saadut arvot, joista käyrät ovat piirretty. Lisäksi liitteestä löytyvät kaikki käyrät, joita työssä ei esitetä. Ne ovat jätetty pois turhan saman asian toistamisen takia.

5.1.1 Jännite jarrutushetkellä

Mittaukset aloitettiin 300 rpm kierrosnopeudella. Kolmen vaiheen keskiarvollinen jännitteen muutos on kuvan 24 mukainen.

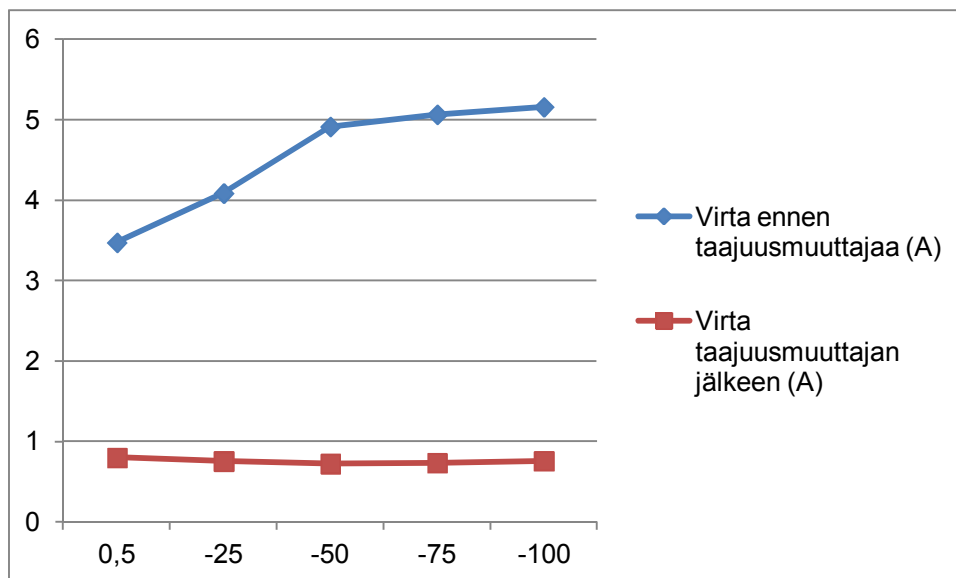


Kuva 24. Jännitteen muutos 300 rpm kierrosnopeudella.

Jännite molemmissa mittapisteissä pysyvät suhteellisen vakioina jokaisella momenttiohjeen arvolla. Taulukosta 4.(ks. s.26) nähdään, että parametri P 2.1.1 pyrkii joka tilanteessa pitämään jännite tason vakiona. Tässä käyrästä mittaus tulos on jokaisen vaiheen keskiarvo tulos joka on yhden vaiheen jännite. Parametri P 2.1.1 on asetettu 400 V:in, jolloin se tarkoittaa pääjännitettä eli kahdenvaiheen välistä potentiaaliero, mutta yhdenvaiheen potentiaaliero on kuvan 24 mukainen. Muilla kierrosnopeuksilla jännitekäyrät ovat kutakuinkin samankaltaisia vakiokäyriä.

5.1.2 Virta jarrutushetkellä

Virta molemmissa mittauspisteissä nousee suhteellisen tasaisesti momenttiohjeen kasvaessa samoin kierrosnopeuden kasvaessa. Kun generaattori pyörii 300 rpm, mutta taajuusmuuttajat eivät ole käynnissä. Tällöin generaattori käy tyhjäkäynnillä jolloin virta on noin 0 A. Virta nousee kuvan 25 mukaisesti (ks. seur. s).

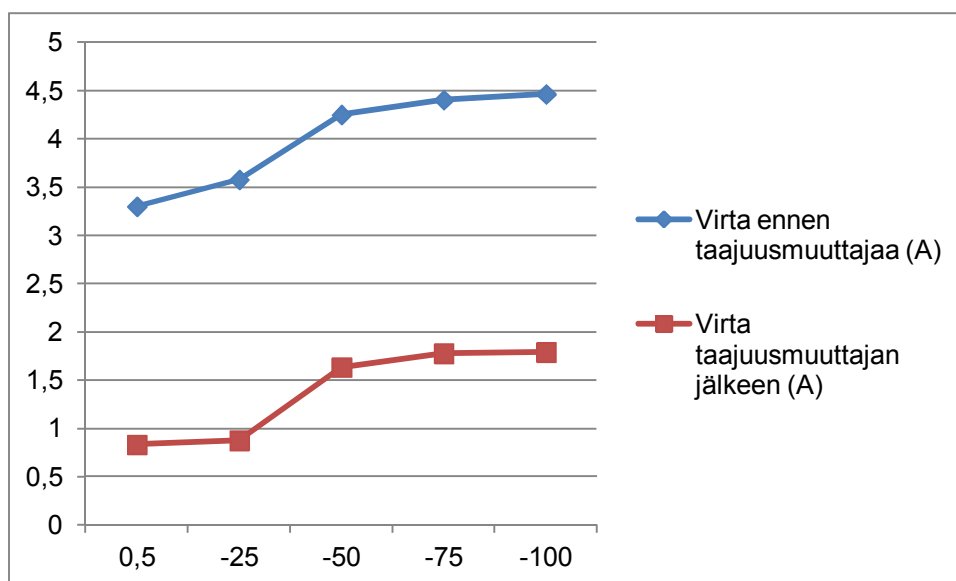


Kuva 25. Virranmuutos 300 rpm kierrosnopeudella.

Heti taajuusmuuttajan käynnistyessä, kuormitusvirta muuttuu. Momenttiohjeen ollessa arvossa 0,5 %:n generaattorin akseli pyörii hieman nopeammin, jolloin teho tulee verkosta päin. Käytännössä taajuusmuuttaja syöttää generaattoria momenttiohjeen mukaisesti. Tällöin virta ohjaavayksikön ja generaattorin välillä on noin 3,5 A. Virran suuruus on kutakuinkin sama jokaisella pyörimisnopeudella momenttiohjeen ollessa 0,5 %. Kun ohjaavalla yksiköllä aletaan jarruttaa akselia, kuormitusvirta alkaa nousta. Syynä virran nousuun on se, kun aletaan jarruttaa, niin ohjaava yksikkö joutuu ottamaan enemmän tehoa verkosta ja mitä enemmän jarrutetaan, sitä enemmän tehoa otetaan.

Taajuusmuuttajan jälkeisessä mittauspisteessä virran suuruus pysyy yllättävän vakiona. Ohjaava yksikkö pystyy antamaan muutaman lisäkierroksen akselille, kun jarrutusenergiaa ei synny verkolle päin virtaa ei mene ollenkaan. Vastaavasti jarrutustilanteessa ohjaavayksikkö joutuu ottamaan lisää virtaa verkosta, jotta se jaksaisi jarruttaa akselia. Jarruttaessaan akselia jarrutusenergiaa syntyy, jolloin virtaa menee jo verkkoon päin. Mitä enemmän jarrutetaan, sitä enemmän otetaan virtaa verkosta, mutta sitä enemmän se myös syöttää takaisin verkkoon päin.

Vastaavasti lähes generaattorin nimellisnopeudessa virtakäyrät ovat kuvan 26 (ks. seur. s.) mukaiset.

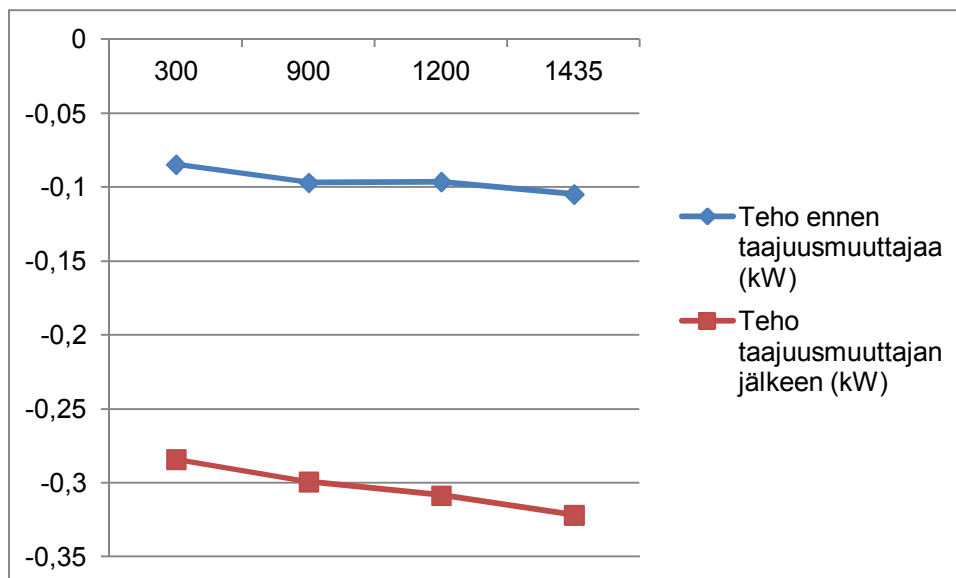


Kuva 26. Virran muutos 1435 rpm kierrosnopeudella.

Kuten kuvasta 26 huomataan, että virta nousee generaattorin ja ohjaavan yksikön välillä samalla tavalla kuin kuvassa 25 (ks. ed. s.). Vastaavasti virtaa menee verkkoon päin jo huomattavasti enemmän, mitä enemmän jarrutetaan. 900 rpm ja 1200 rpm kierrosnopeuksilla virtakäyrät käyttäytyvät samalla tavalla kuin kuvissa 25 ja 26. Pienemmillä kierrosnopeuksilla virtaa tarvitaan vähemmän jarruttamiseen ja samalla sitä työnnetään vähemmän verkkoon päin kuin lähes nimellisnopeudella.

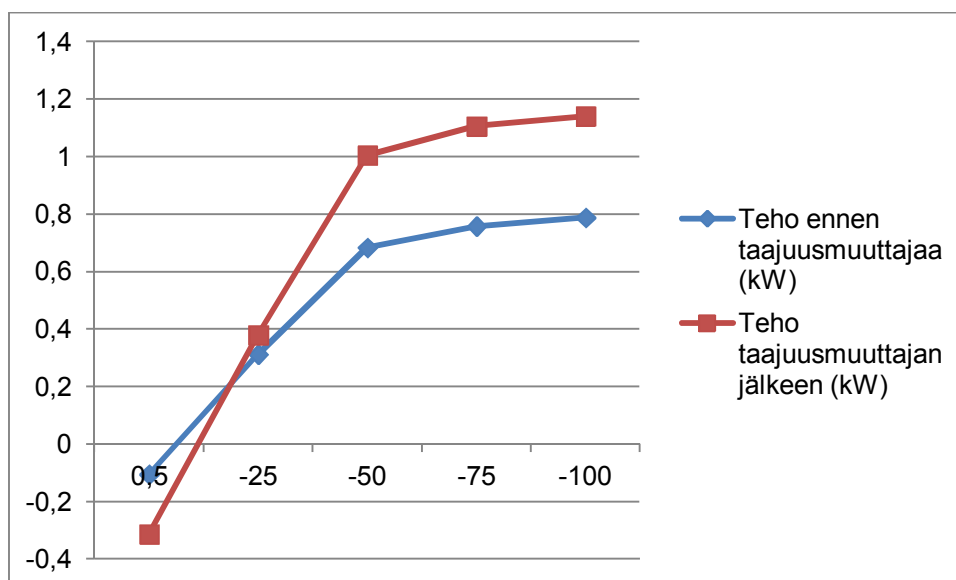
5.1.3 Pätöteho jarrutushetkellä

Pätöteho komponentti käyttäytyy samalla tavalla kuin virta. Mitä suurempi kierrosnopeus ja suurempi jarrutusmomentti, sitä suurempi verkkoon päin työntyvä pätöteho komponentti. Tarkastellaan tehon muutosta 0,5 %:n momenttiohjeella ja se on kuvan 27 mukainen (ks. seur. s.). Tämän jälkeen verrataan kuvaa 27 kuvaan 28 (ks. seur. s.), joka pyörii lähes nimellisnopeudessa.



Kuva 27. pätötehon muutos eri pyörimisnopeuksilla 0,5 % momenttiohjeella.

Kuvasta 27 huomataan, että 0,5 %:n momenttiohjeella, mitä suurempi kierrosnopeus, sitä enemmän tehoa otetaan verkosta generaattoriin päin. Kun akselia jarrutetaan, tehoa alkaa muodostua verkkoon päin. Parhaiten sen huomaa 1435 rpm kierrosnopeudella, jolloin jarrutus tehoa syntyy eniten. Kuva 28 kuvaa tehon siirtymistä verkkoon päin.

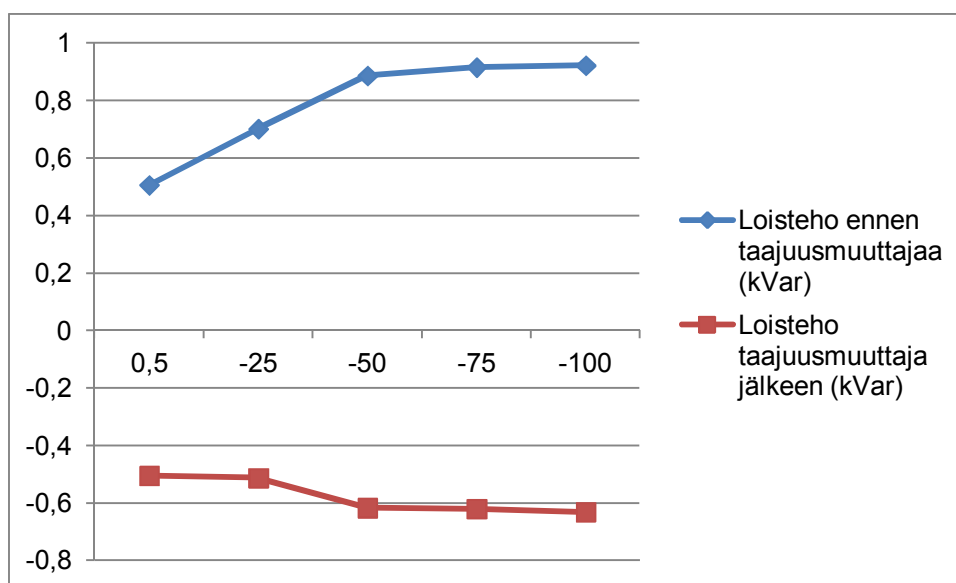


Kuva 28. Tehon muutos 1435 rpm kierrosnopeudella.

Kuvasta 28 (ks. ed. s.) nähdään millä teholla taajuusmuuttajaa jarrutetaan eli mittauspiste ohjaavan yksikön ja generaattorin välillä eli teho ennen taajuusmuuttajaa. Verkkoon päin suuntautuvaa tehoa kuvastaa taajuusmuuttajan jälkeinen käyrästä. Ottotehoa verkosta eri momenttiohjeilla kuvastaa käyrästä ennen taajuusmuuttajaa akselin pyöriessä lähes nimellinopeudessa. Kun generaattorin akselia aletaan kuormittaa jarruttavalla momentilla, generaattorista lähtevä teho kasvaa kuormituksen kasvaessa. Jarrutuksesta muodostuvan tehon suhde ottotehoon nähden kasvaa kuormituksen lisääntyessä, jolloin verkkoon päin tuotetaan enemmän tehoa verkkoon päin.

5.1.4 Loisteho jarrutushetkellä

Loistehoon vaikuttaa generaattorin luoma induktiivinen loisteho ja taajuusmuuttajien sisällä olevien kondensaattorien luoma kapasitiivinen loisteho. Kierrosnopeudet eivät vaikuta loistehon suuruuteen, mutta vastaavasti momenttiohjeen suuruus vaikuttaa, kuten kuvasta 29 nähdään.

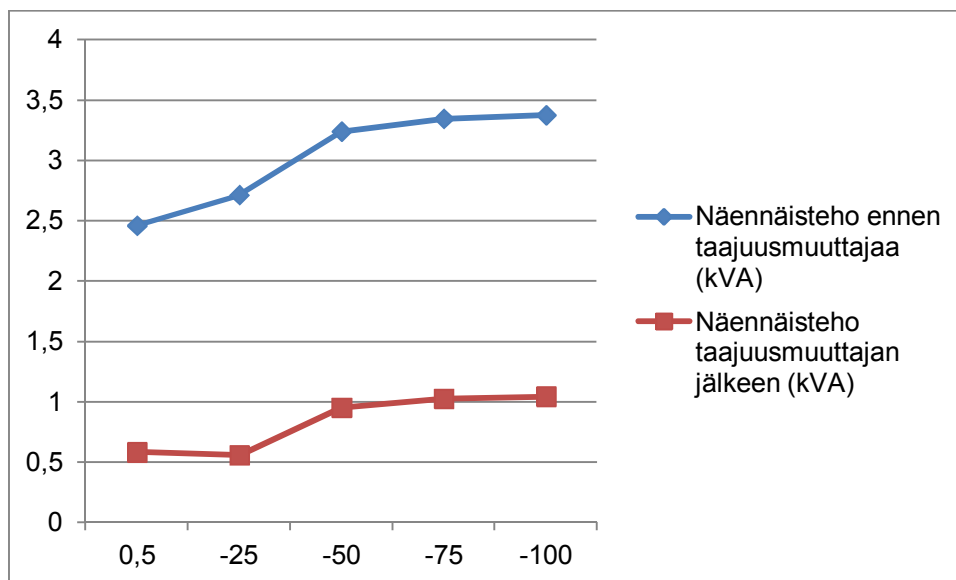


Kuva 29. Loistehon muutos 1435 rpm kierrosnopeudella.

Taulukosta 2, (ks. s. 24) nähdään, että generaattorin tehokerroin on 0,79, jolloin kuormittuessa loistehoa siirtyy mukana taajuusmuuttajille. Loisteho suuruus on riippuvainen vain kuormituksen suuruudesta. Verkkoon päin menevää loistehoon vaikuttaa taajuusmuuttajat itse. Ilmeisesti taajuusmuuttajien kondensaattorit vaikuttavat loistehon kapasitiiviseen arvoon, joka nousee momenttiohjeen kasvaessa.

5.1.5 Näennäisteho jarrutushetkellä.

Näennäistehon suuruuteen vaikuttavat suoraan pätö- ja loisteho komponenttien suuruus. Mikäli kuormitusvirta kasvaa, silloin pätö- ja loisteho kasvavat ja tällöin näennäisteho kasvaa.



Kuva 30. Näennäisteho muutos 1200 rpm.

Näennäisteho suuruuteen voidaan vaikuttaa kompensoinnilla.

5.1.6 Hyötysuhde jarrutuksessa

Jarruttavana tehona kiinnostaa pätötehon hyötysuhde, koska pätöteholla tehdään mekaanista työtä. Tästä syystä halutaan tietä, että paljonko mahdollisesta pätötehosta saadaan työnnettyä verkkoon. Jarrutuksesta aikaan saatu hyötysuhde muodostuu generaattorin muodostamasta tehosta ja verkkoon päin menevästä tehon suhteesta. Hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla 8.

$$\eta = \frac{P_2}{P_{gen}} * 100 \% \quad (8)$$

η on Hyötysuhde [%]

P_2 on Jarrutus teho [kW]

P_{gen} on Generaattorin teho [kW]

Hyötysuhteella mitataan jarrutustehon määrää kaikesta mahdollisesta tehosta jota voidaan generaattorista saada irti juuri sen hetken kuormituksesta.

Verkkoon päin menevät jarrutus tehot on saatu tehoanalysaattorista kirjattua, mutta laskennallisesti täytyy selvittää generaattorin teho jokaisessa kuormitusvaiheessa. Teho saadaan laskettua kaavalla 9.

$$P_{gen} = \sqrt{3} * U_N * I * \cos \varphi \quad (9)$$

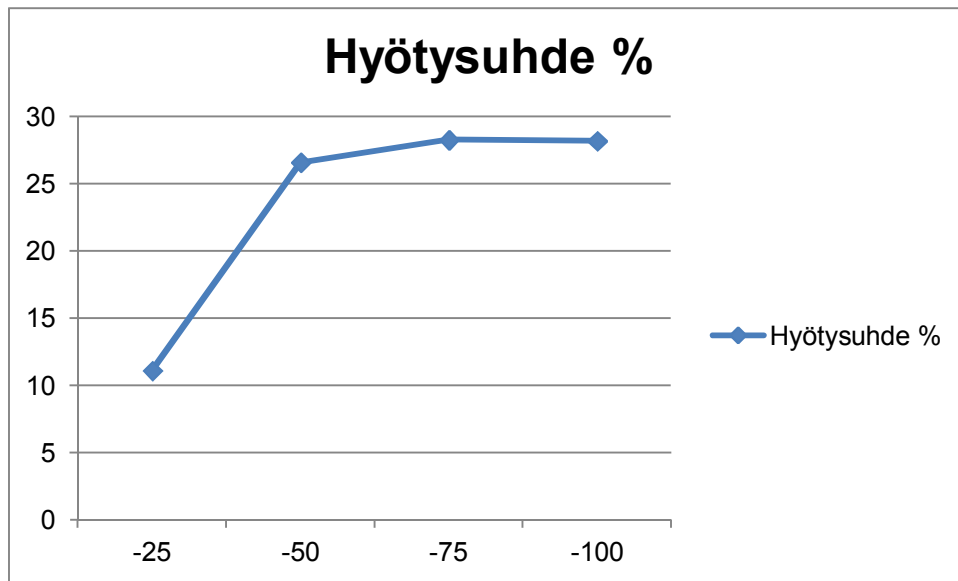
U_N on Nimellisjännite

I on kuormitusvirta

$\cos \varphi$ on 0,79

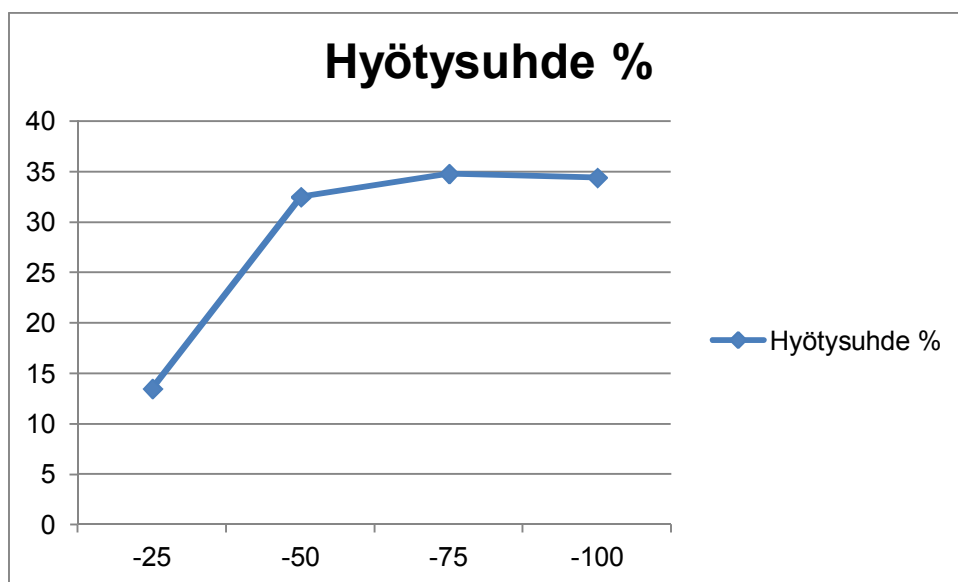
Nimellisjännite on 400 V ja kuormitusvirta saadaan tehoanalysaattorista generaattorin ja ohjaavan yksikön mittauspisteestä. Tehokerroin saadaan moottorin kilpiarvoista joka löytyy taulukosta 3 (ks. s. 24). Kaavoja 8 ja 9 käyttämällä on laskettu hyötysuhteet eri nopeuksilla ja jarruttavilla momenttiohjeilla.

0,5 %:n momenttiohjeella kaikki teho otetaan verkosta, jolloin verkkoon päin ei siirretä tehoa ollenkaan. Generaattorin hyötysuhdetta määrittäessä 0,5 %:in momenttiohjeella mitään hyötysuhdetta ei voida laskea, koska taajuusmuuttaja syöttää generaattoria. Kunnes generaattorin akselia aletaan jarruttaa 300 rpm:n akselinopeudella, tehoa hie-
man verkkoon päin tuotetaan, mutta kierrosnopeuksien ollessa näin alhaiset jarrutukset tehoa ei muodostu tarpeeksi, jotta voitaisiin laskea hyötysuhde. Tästä syystä mitään hyötysuhdelaskelmia ei olla laskettu + 0,5 %:n momenttiohjeella ja 300 rpm kierrosnopeudella.



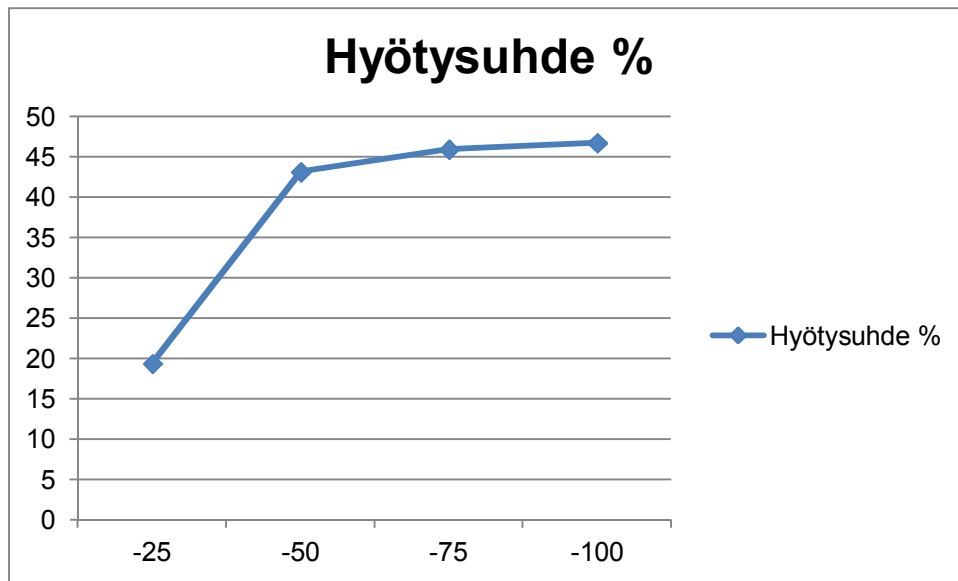
Kuva 31. Hyötysuhde 900 rpm kierrosnopeudella.

Kuvasta 31 huomataan kierrosnopeuksien noustessa enemmän, hyötysuhde paranee huomattavasti. Mitä enemmän akselia jarrutetaan, sitä enemmän hyötysuhde paranee. Parannus johtuu siitä, kun tehoa siirtyy enemmän verkkoon päin suhteessa siihen mitä verkosta otetaan.



Kuva 32. Hyötysuhde 1200 rpm kierrosnopeudella.

Kierrosnopeuksien noustessa, hyötysuhde entisestään paranee kuten kuva 32 osoittaa.



Kuva 33. Hyötysuhde 1435 rpm kierrosnopeudella.

Lähes generaattorin nimellisnopeudessa (kuva 33) hyötysuhde vain paranee, mutta kun ollaan nimellisnopeudessa, hyötysuhde ei oikein voi tästä enää parantua. Hyötysuhteessa päästään parhaimmillaan noin 50 %:in luokkaan. Hyötysuhteen paraneminen kierrosnopeuden kasvaessa johtuu siitä, että mitä nopeammin akseli pyörii, sitä enemmän tehoa voidaan saada irti generaattorista. Suurilla kierrosnopeuksilla jarrutuskuormaa tulee suhteessa enemmän kuin pienillä kierrosnopeuksilla, vaikka jarrutusmomentti on sama. Sen voi todistaa kaavalla 10:

$$P = M_J \omega \quad (10)$$

P on Jarrutuksesta muodostunut teho

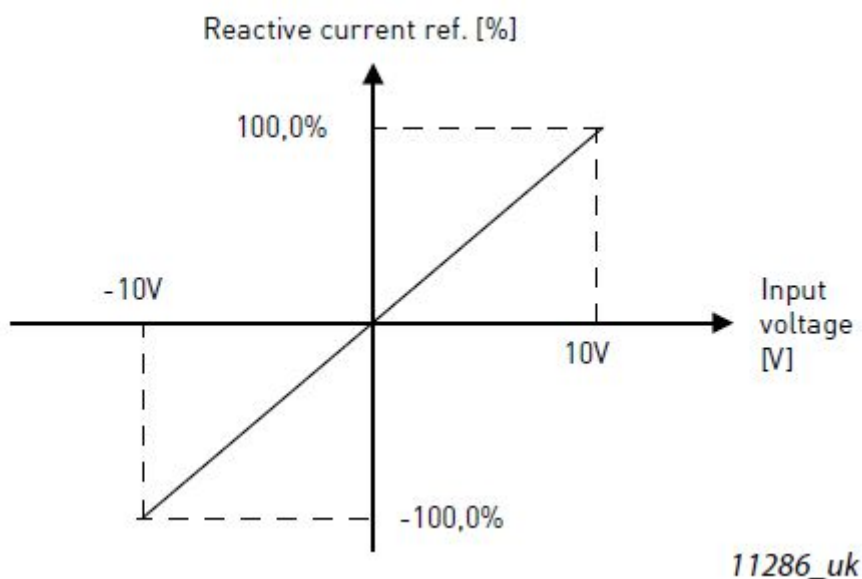
M_J on jarruttava momenttiohje

ω on Akselinkierrosnopeus

Jos momenttiohje pysyy vakiona, mutta kierrosnopeus kasvaa, samoin kasvaa teho.

5.2 Kompensointi

AFE-yksiköllä voidaan kompensoida verkkoon päin menevää tehoa ja hävittää loistehot pois. AFE-yksiköstä löytyy Reactive Curr ref. parametri (P 2.4.11). Tällä parametrilla voidaan kompensoida kapasitiivista tai induktiivista virtaa halutuksi. Virran säädöllä voidaan pienentää loistehon suuruutta verkkoon päin syöttäessä. Kuva 34 havainnollistaa kompensoinnin säätö väliä.



Kuva 34. AFE yksikön kompensoinnin säätö käyrä. /6/

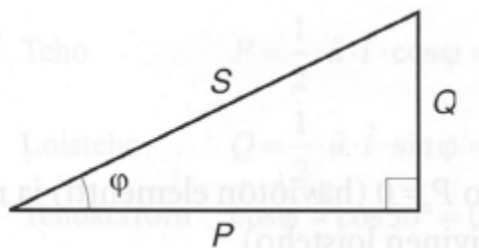
AFE-yksikön parametria P 2.4.11 käyttäen voidaan manuaalisesti säätää reaktiivisen virran referenssiä välillä -100 % - 100 %. Positiivinen referenssi arvo luo induktiivista tehoa verkkoon, kun vastaavasti negatiivinen referenssin arvo luo kapasitiivista tehoa verkkoon. Kompensoinnin aikaan saamiseksi täytyy tietää, mitä loistehoa verkkoon päin syötetään, jotta kompensointi voidaan toteuttaa oikein. /6/

5.2.1 Kompensoinnin vaikutus hyötysuhteeseen jarruttaessa

Kaikki aikaisemmat jarrutus hyötysuhde mittaukset suoritettiin ilman kompensointia eli parametri Reactive Curr Ref. (P 2.4.11) oli arvossa 0,0 %. Mittaustuloksia on paljon ja

kompensoinnin säätö on manuaalisesti hyvin hidasta. Tässä työssä manuaalisen säädön hitauden takia tutkitaan vain jokaisen kierrosnopeuden yksi jarruttavan momenttiohje, joka kompensoidaan. Tässä vaiheessa voidaan todeta, että kompensointi ei vaikuta yhtään pätötehon arvoon, jolloin aikaisemmat hyötysuhdelaskelmat ovat täysin samat. Loistehon kompensointi ei vaikuta työtä tekevän eli pätötehon suuruuteen, vaan ainoastaan näennäistehon suuruuteen ja sitä kautta kuormitusvirtaan. Loistehoa kompensoidessa näennäisteho ja kuormitusvirta pienenevät ja tätä kautta systeemin tehokerrointa voidaan parantaa.

Systeemin tehokerroin ja virtojen komponentit voidaan havainnollistaa käyttäen tehokolmiota (kuva 35).



Kuva 35. Tehokolmio.

Tehokolmiosta voidaan todeta, että kun loisteho isonee, tehokertoimenkulma suurenee ja tästä seuraa, että näennäisteho kasvaa. Sama tapahtuu virtakomponenteilla. Vastaavasti kun loisteho pienenee, näennäisteho pienenee ja samalla näennäisvirta komponentti pienenee, ja tähän pyritään kompensoinnilla.

5.2.2 Kompensoinnin tulosten käsittely

Mittaus suoritettiin seuraavasti, että jokaisesta eri kierrosnopeudesta kompensointiin yksi jarruttava momentti ohje. Kompensoinnin tavoitteena on saada loistehot mahdollisimman lähelle nollaa. Kompensointi suoritettiin manuaalisesti AFE-yksikön ohjauspalikasta, kunnes saatiin paras mahdollinen kompensointi. Tämän jälkeen vertailtiin näennäistehojen ja virtojen eroja aikaisempiin mittaustuloksiin. Jokaisesta mittausvaiheesta luotiin käyrät tehojen ja virtojen muutoksista. Käyrät ovat piirretty siten, että x-akselilla on eri kierrosnopeudet ja y-akselilla tehollisarvo, jota tarkastellaan. Kuvissa esiintyy kaksi käyrää, joista sininen käyrä kuvaa tehollisarvoa ilman kompensaatiota ja punai-

nen käyrä vastaavaa tehollisarvoa kompensoituna. Eri kierrosnopeuksilla käytettiin taulukon 4 mukaisia jarruttavia momenttiohjeita.

Taulukko 4. Käytetyt momentti ohjeet, jotka kompensointiin.

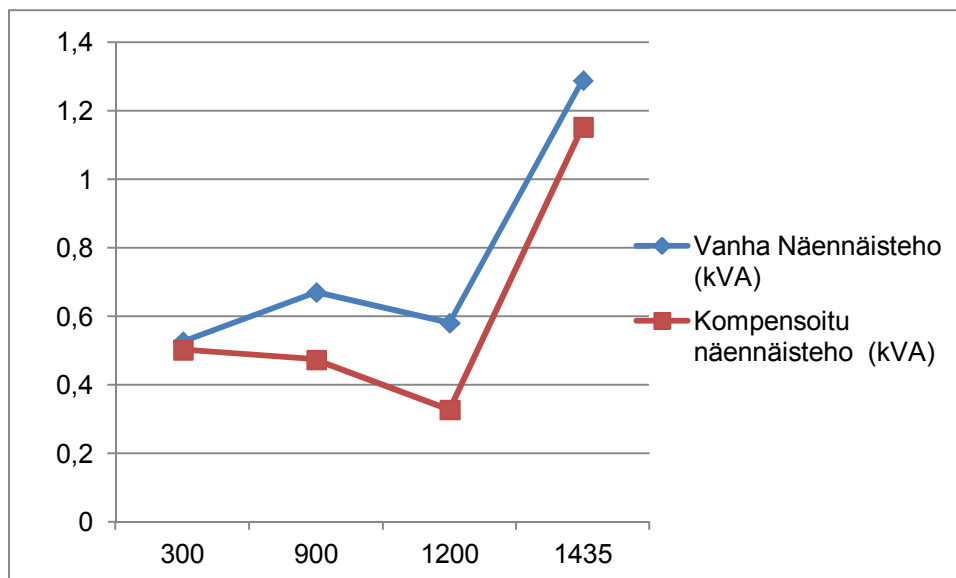
Kierrosnopeus (rpm)	Momentti ohje (%)
300	-75
900	-50
1200	-25
1435	- 100

Ensimmäisenä tarkastellaan tehollisarvoja jotka työntyvät verkkoon päin. Taulukosta 6 voidaan havaita kuinka paljon loistehoa saatiin kompensoitua milläkin kierrosnopeudella ja millä Reactive Curr Ref. parametri (P 2.4.11) arvolla.

Taulukko 5. Loistehot kompensoituna eri parametriarvoilla.

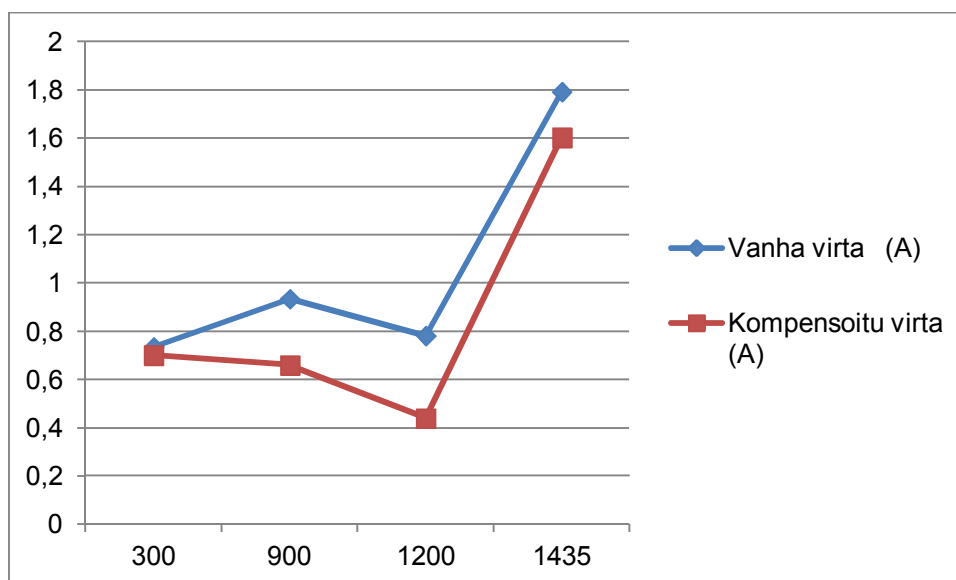
Loisteho kompensoituna (kVar)	Reactive Curr Reff arvo (%)	Kierrosnopeus (rpm)
-0,2351	2,2	300
-0,2108	4,2	900
-0,1876	2,8	1200
-0,1687	1,1	1435

Taulukosta 5 huomataan, että verkkoon päin menevä loisteho on negatiivista, joten teho on kapasitiivista. Kapasitiivisen loistehon kompensointi voidaan pienentää positiivisella Reactive Curr Reff. parametriarvolla (ks. 5.2.1). Seuraavista käyräkuvista nähdään, miten kompensaatio onnistuu pienentämään näennäistehoa ja virtaa systeemissä. Kuvasta 36 (ks. seur. s.) huomataan näennäistehon muutos kompensoituna. Liitteestä 2 löytyy tehoanalysaattorista mitatut arvot, joista käyrät ovat piirretty.



Kuva 36. Verkkoon päin menevän näennäistehon muutos.

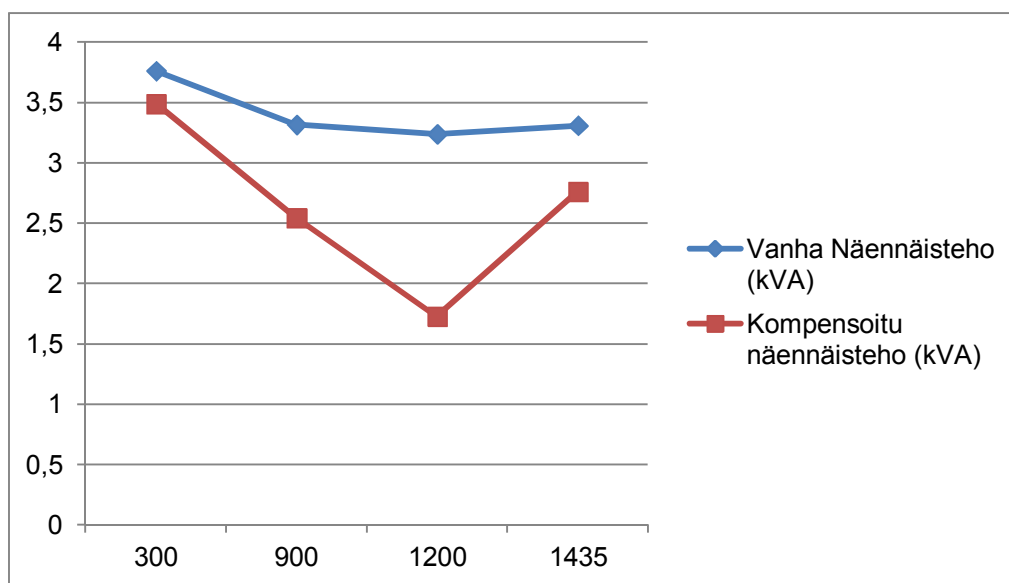
Alhaisilla kierrosnopeuksilla kompensatio on vähäistä, mutta kuitenkin kompensatioita tapahtuu. Kierrosnopeuksien kasvaessa kompensatio paranee. 1200 rpm:n nopeudella saadaan tehollisarvot tiputettua jo noin puoleen kompensoimattomasta tehollisarvoista. Vastaavasti lähes nimellisnopeudessa kompensatio on vähäistä, koska tehokerroin on parhaimmillaan, jolloin Kompensoitavaa ei ole paljon.



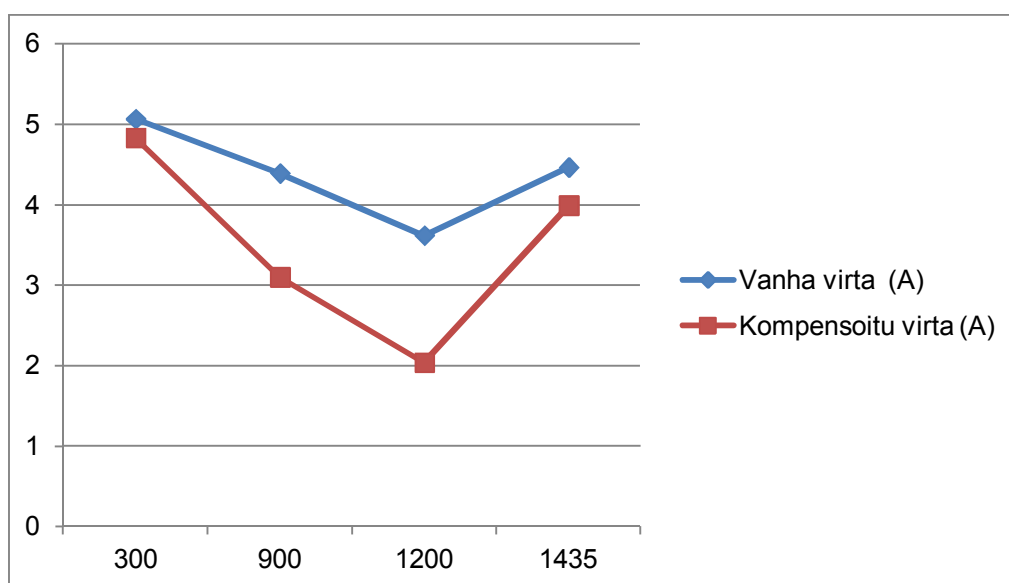
Kuva 37. Verkkoon päin menevän virran muutos.

Kuvasta 37 (ks. ed. s.) huomataan, että verkkoon päin menevä virta seuraa näennäistehoa kutakuinkin samassa suhteessa. Kun näennäisteho laskee, laskee virtakin.

Vastaavasti seuraavat käyrät kuvaavat generaattorin ja ohjaavan yksikön välistä tehollisarvojen muutosta. Molemmat tehollisarvot käyttäytyvät samalla tavalla kuin äskeiset verkkoon päin työntyvät tehollisarvot. Ainoastaan tehollisarvot ovat hieman eri luokkaa. Kuvasta 38 kompensoinnin vaikutus näennäistehoon ja kuvasta 39 vaikutus kuormitusvirtaan.



Kuva 38. Kompensoinnin vaikutus näennäistehoon generaattorin ja ohjaavan yksikön välillä.



Kuva 39. Kompensoinnin vaikutus kuormitusvirtaan generaattorin ja ohjaavan yksikön välillä.

Kuten käyristä huomataan, kompensoinnin vaikutukset ovat kutakuinkin samat. Ainoastaan kierrosnopeudella ja jarrutusmomentilla tulee eroja. Tehokertoimen hyvään parantamiseen vaikuttaa paljon se, että kuinka paljon systeemistä voidaan loistehoa poistaa.

6 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä pohditaan miten tämä laboratoriomittaus soveltuisi tuleville opiskelijoille. Tämä mittaus antaa käsityksen siitä, miten generaattorista muodostunut jarrutus energia syntyy ja miten sitä voidaan hyödyntää ja miten hyvin. Mittaukset onnistuivat hyvin, vaikka työn aikana jouduttiin tekemään kytkentä muutoksia mittauskytkennän luomiseksi. Alun perin työ oli tarkoitus suorittaa tahtikoneita käyttäen, mutta sitä testattaessa AFE-yksikkö ei toiminut. Toimimattomuus johtui siitä, kun jarruttava muuttaja ei jaksanut jarruttaa tahtikoneen perässä olevaa oikosulkukonetta. Akselin jarruttamiseen tarvittava teho on liian suuri, jolloin tarvittava kuormitusvirta kasvaa liian isoksi AFE-yksikölle. Kone oli liian suuri mittauksia varten. Moottorit joita käytettiin mittauksissa, olivat hieman alimitoitettu, mutta ei se haitannut mittauksia. Opiskelijoita ajatellen nämä kytkentämuutokset olisi hyvä jättää pois ja hankkia tarvikkeet kytkennän järkevään rakentamiseen. Mittausten parantamiseksi, olisi syytä hankkia isompi generaattori jarrutettavaksi, tällöin saataisiin enemmän tehoa verkkoon päin. Isommalla koneella saataisiin todennäköisesti paremmat hyötysuhdearvot aikaiseksi, jolloin mittaus olisi huomattavasti antoisampi. Lisäksi mittausten parantamiseksi voisi harkita generaattorin akselin kuormitusta esimerkiksi lisäpainolla. Mittausten hyötysuhde saattaisi parantua, jos jo kuormitettua generaattoria alettaisiin jarruttaa momenttiohjeella.

Mittaustuloksia tuli paljon käsiteltäväksi ja analysoitavaksi. Tästä syystä neljän tai viiden henkilön mittausryhmällä voisi suorittaa mittaukset vain nimellisesnopeudella, koska yhden päivän ajalla ei ehdi kaikki mittauksia järkevästi suorittamaan. Nimellisesnopeus on paras kierrosnopeus mittauksille, koska hyötysuhde on parhaimmillaan ja silloin verkkoon päin työnnetään eniten tehoa. Mittaukset tulisi suorittaa kompensoimattomana ja kompensoituna, tällöin opiskelijat joutuisivat pohtimaan kompensoimista. Huonona puolena mittauksissa on se, että käyttö-ohjeita taajuusmuuttajille ei ole eikä edes verkosta löydy niitä. Vaconin sivuilta löytyy uusimpien AFE-yksiköiden käyttö-ohjeita, jotka ovat kutakuinkin samat, mutta parametrijärjestykset ovat hieman erilaiset ja nimet voi-

vat olla erilaiset. Tämän takia työssä on pyritty tuomaan esiin tarkasti, mitä parametreja on käytetty tai muutettu ja miksi.

Ennen kuin opiskelijat alkaisivat tehdä tätä mittausta, opiskelijan olisi hyvä tietää kaikki perusteet, jotka teoriaosuudella esitettiin. Lisäksi opiskelijoiden olisi syytä tuntea ja pohtia komponentteja, joita tarvitaan verkkoon jarrutuksessa ja miksi. Esimerkiksi la-
tauspiirin tarkoitus, LCL-suodattimen tarkoitus ja ero AFE-yksikön ja ohjaavan yksikön välillä olisi ainakin syytä tuntea. Opiskelijoiden olisi syytä pohtia onko kyseinen jarrutus-
tapa kustannustehokas ja järkevä.

Lähteet

/1/ Hieta-Wilkman, Sinikka: Taajuusmuuttajat: käyttö, asennus, häiriöt. Espoo: Sähköinfo. 1997.

/2/ Niiranen, Jouko: Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: OTATieto. 1999.

/3/ Luentomoniste. Taajuusmuuttaja. Helsinki: Metropolian ammattikorkeakoulu. 2013.

/4/ Hietalahti, Lauri: Säädetty sähkömoottorikäyttö. Vantaa: Amk-Kustannus Oy, Tammitekniikka. 2012.

/5/ Käyttö-opas. AFE taajuusmuuttaja. Vacon. 2013.

/6/ Sovellus-opas. AFE taajuusmuuttaja. Vacon. 2013

Tehoanalysaattorista mitatut tehollisarvot sekä tehollisarvo käyrät

Liitteessä 1 esitetään kaikki tehollisarvot, jotka mitattiin tehoanalysaattorista. Lisäksi kaikki tehollisarvo käyrät, joita ei työssä esitetty.

Taulukko 1. Tehollisarvot 300 rpm kierrosnopeudella, momenttiohjeen ollessa 0,5 %:in luokkaa.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	248,26	239
I (A)	3,4742	0,801
P (kW)	-0,0845	-0,28379
Q (kVar)	0,77	-0,5013
S (kVA)	2,5861	0,5762
λ (tehokerroin)	-0,0314	-0,373
φ (Vaihekulma)	91,85	110,26
RPM	297	
U-dc (V)	32,7	

Taulukko 2. Momenttiohjeella - 25 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	247,81	240,17
I (A)	4,0894	0,7575
P (kW)	-0,0237	-0,11294
Q (kVar)	0,86	-0,49921
S (kVA)	3,0313	0,54651
λ (tehokerroin)	-0,0077	-0,4022
φ (Vaihekulma)	90,4	103,12
RPM	256,2	
U-dc (V)	28,84	

Taulukko 3. Momenttioshojeella - 50 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	247,25	240,26
I (A)	4,9163	0,7269
P (kW)	0,0036	-0,10042
Q (kVar)	0,94	-0,4936
S (kVA)	3,6406	0,5257
λ (tehokerroin)	-0,0008	-0,3212
φ (Vaihekulma)	90	101,75
RPM	220	
U-dc (V)	27,3	

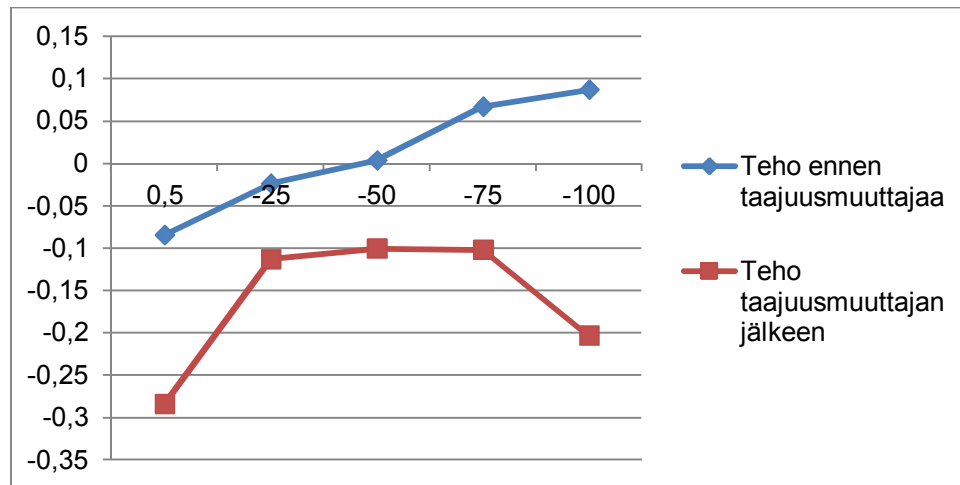
Taulukko 4. Momenttioshojeella - 75 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	247,16	240,73
I (A)	5,0656	0,7351
P (kW)	0,067	-0,1019
Q (kVar)	1,1253	-0,49251
S (kVA)	3,7619	0,52727
λ (tehokerroin)	-0,0012	-0,328
φ (Vaihekulma)	90,6	101,16
RPM	215	
U-dc (V)	27,15	

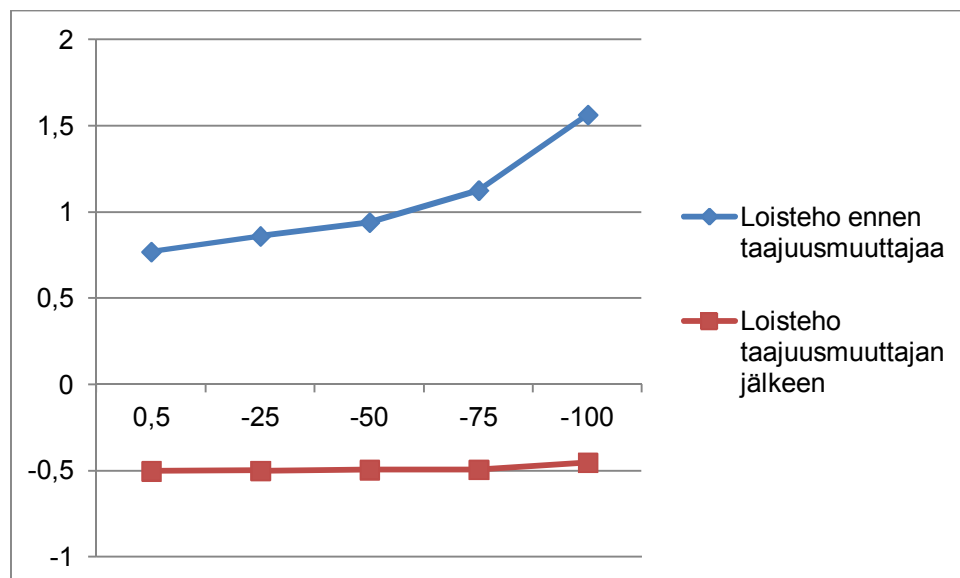
Taulukko 5. Momenttioshojeella - 100%:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	247,16	240,73
I (A)	5,0656	0,7351
P (kW)	0,067	-0,1019
Q (kVar)	1,1253	0,49251
S (kVA)	3,7619	0,52727
λ (tehokerroin)	-0,0012	-0,328
φ (Vaihekulma)	90,6	101,16
RPM	215	
U-dc (V)	27,15	

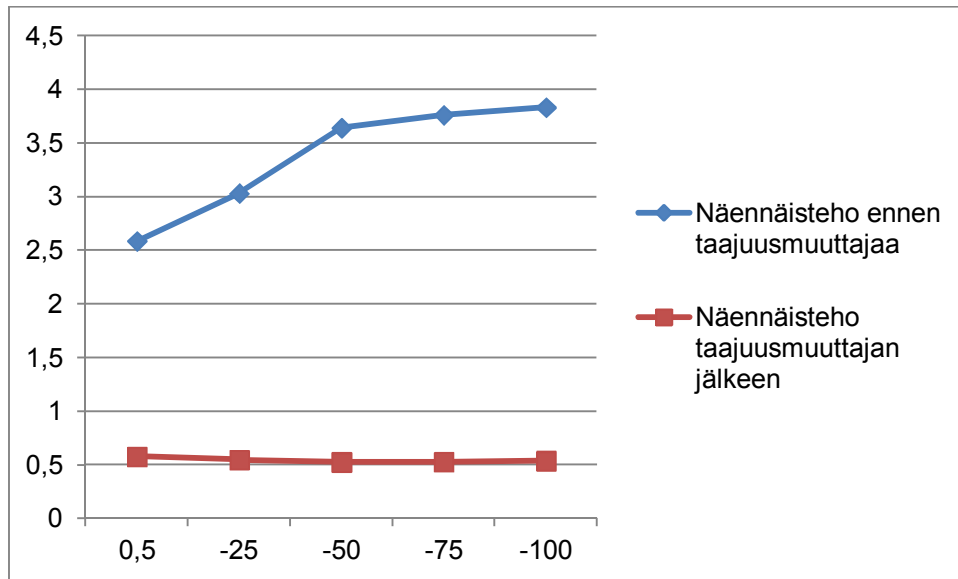
Seuraavaksi 300 rpm tehollisarvot käyrinä.



Kuva 1. Pätötehon muutos 300 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 2. Loistehon muutos 300 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 3. Näennäistehon muutos 300 rpm kierrosnopeudella.

Taulukko 6. Tehollisarvot 900 rpm kierrosnopeudella, momenttiohjeen ollessa 0,5 %:in luokkaa.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,7	238,42
I (A)	3,422	0,8156
P (kW)	-0,0968	-0,29915
Q (kVar)	0,6948	-0,49598
S (kVA)	2,527	0,59149
λ (tehokerroin)	-0,0375	-0,5123
φ (Vaihekulma)	92,09	120,82
RPM	900	
U-dc (V)	93,6	

Taulukko 7. Momenttiosuhteeseen ollessa - 25 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,89	238,24
I (A)	3,6863	0,7098
P (kW)	0,156	0,1138
Q (kVar)	0,8128	-0,49041
S (kVA)	2,7821	0,50966
λ (tehokerroin)	0,0552	0,2234
φ (Vaihekulma)	86,85	77,01
RPM	830	
U-dc (V)	86,4	

Taulukko 8. Momenttiosuhteeseen ollessa - 50 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,7	238,76
I (A)	4,3899	0,9345
P (kW)	0,3552	0,42413
Q (kVar)	0,9932	-0,509
S (kVA)	3,3161	0,67063
λ (tehokerroin)	0,1081	0,6382
φ (Vaihekulma)	83,79	50,14
RPM	781,4	
U-dc (V)	85,5	

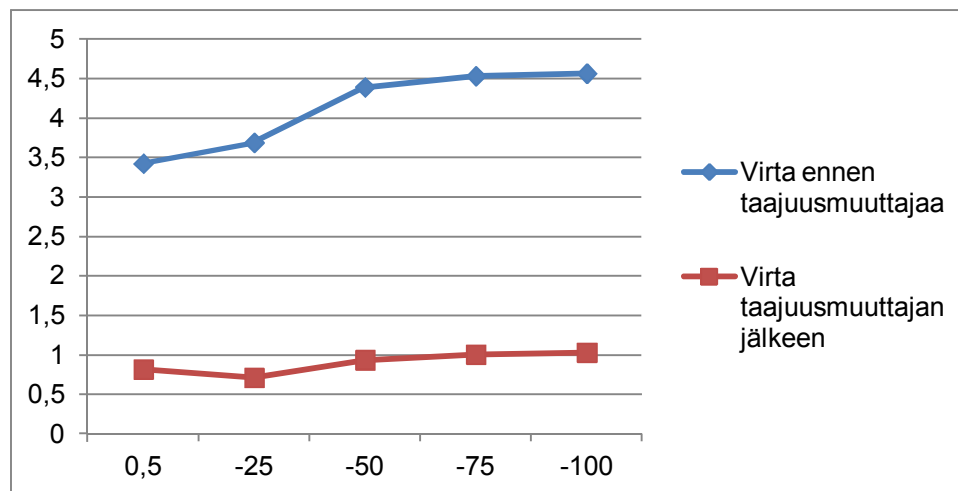
Taulukko 9. Momenttiosuhteeseen ollessa - 75 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,82	238,92
I (A)	4,5315	1,004
P (kW)	0,3891	0,5039
Q (kVar)	1,0264	-0,51282
S (kVA)	3,4145	0,7151
λ (tehokerroin)	0,115	0,7006
φ (Vaihekulma)	83,41	45,5
RPM	775	
U-dc (V)	85,2	

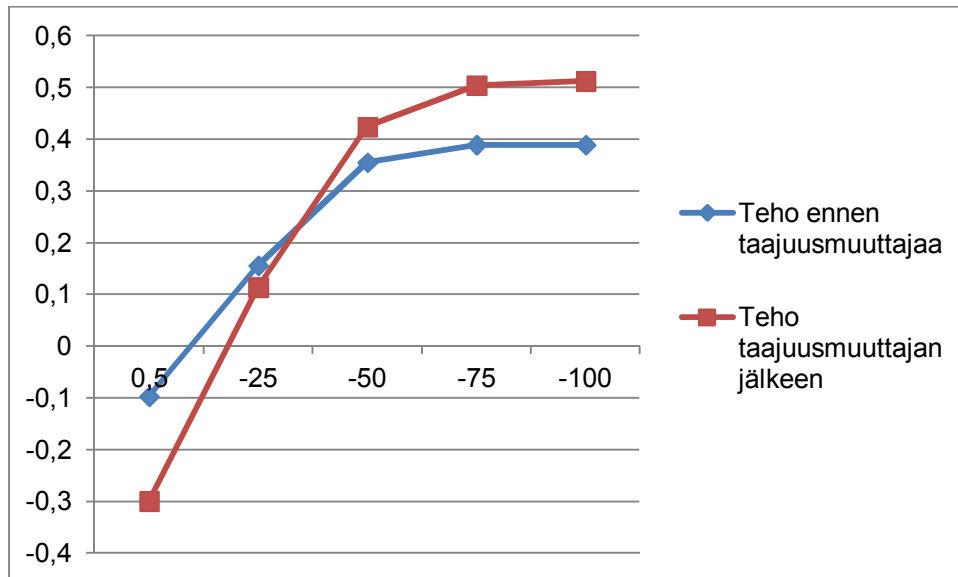
Taulukko 10. Momenttiohjeen ollessa - 100 %:a

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,74	238,8
I (A)	4,5645	1,029
P (kW)	0,398	0,51237
Q (kVar)	1,0219	-0,52126
S (kVA)	3,443	0,7402
λ (tehokerroin)	0,1143	0,7038
φ (Vaihekulma)	83,3	45,18
RPM	773	
U-dc (V)	85,1	

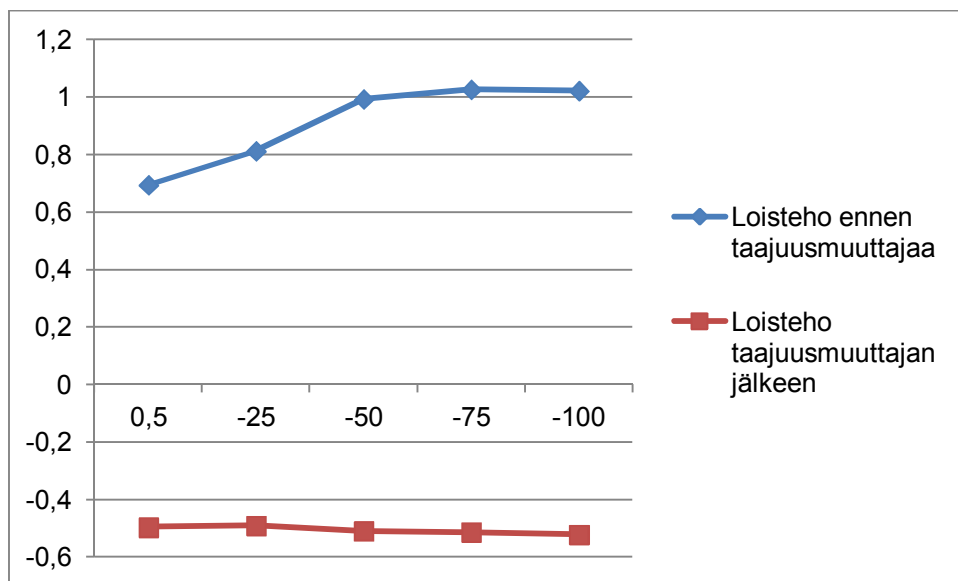
Seuraavaksi 900 rpm kierrosnopeuksien tehollisarvot käyrinä.



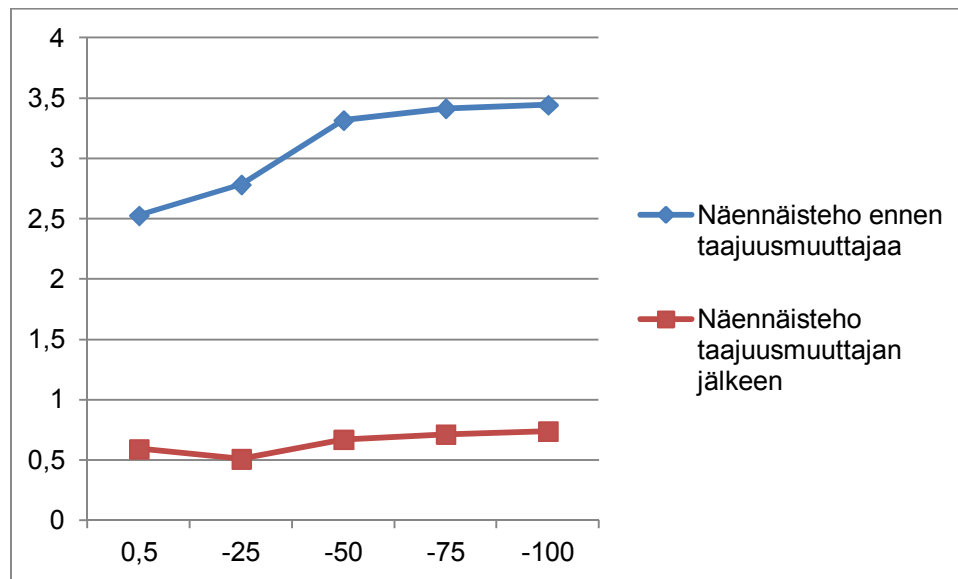
Kuva 4. Virran muutos 900 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 5. Pätötehon muutos 900 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 6. Loistehon muutos 900 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 7. Näennäistehon muutos 900 rpm kierrosnopeudella.

Taulukko 11. Tehollisarvot 1200 rpm kierrosnopeudella, momenttiosuuden ollessa 0,5 %:in luokkaa.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	249,97	238,08
I (A)	3,2798	0,8291
P (kW)	-0,0963	-0,30828
Q (kVar)	0,6255	-0,4915
S (kVA)	2,4583	0,58125
λ (tehokerroin)	-0,0389	-0,5307
φ (Vaihekulma)	92,81	122,07
RPM	1201	
U-dc (V)	124,1	

Taulukko 12. Momenttiohjeen ollessa - 25 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	250,79	238,56
I (A)	3,6186	0,7816
P (kW)	0,2433	0,26861
Q (kVar)	0,7591	-0,49562
S (kVA)	2,7122	0,55534
λ (tehokerroin)	0,0879	0,4333
φ (Vaihekulma)	84,87	61,9
RPM	1127	
U-dc (V)	118,9	

Taulukko 13. Momenttiohjeen ollessa - 50 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,33	238,81
I (A)	4,304	1,3244
P (kW)	0,5497	0,7648
Q (kVar)	0,9389	-0,56669
S (kVA)	3,2388	0,9504
λ (tehokerroin)	0,168	0,8117
φ (Vaihekulma)	80,36	36
RPM	1100	
U-dc (V)	115,4	

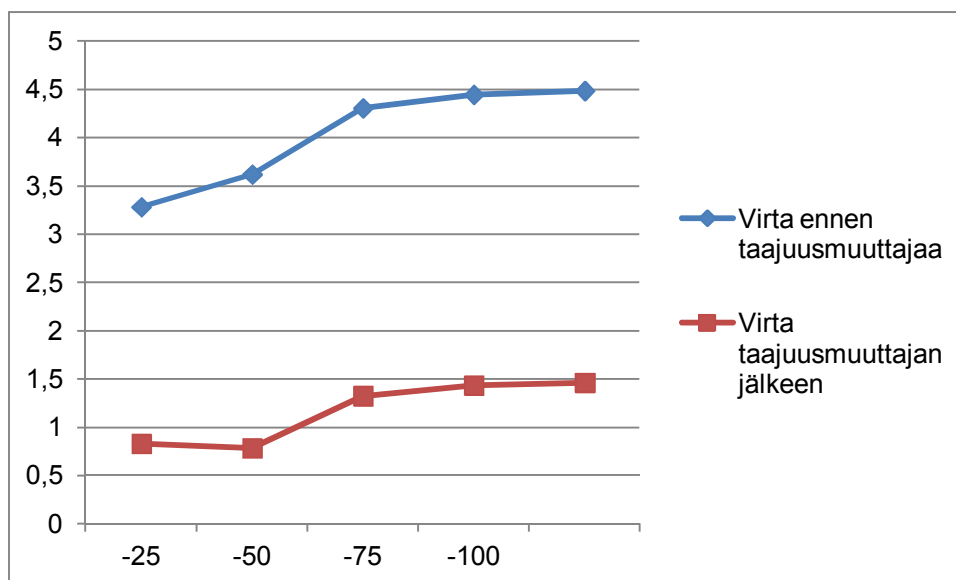
Taulukko 14. Momenttiohjeen ollessa - 75 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,35	238,68
I (A)	4,4438	1,4335
P (kW)	0,6	0,84605
Q (kVar)	0,9619	-0,57651
S (kVA)	3,344	1,025
λ (tehokerroin)	0,1794	0,8294
φ (Vaihekulma)	79,68	32,3
RPM	1070	
U-dc (V)	114,9	

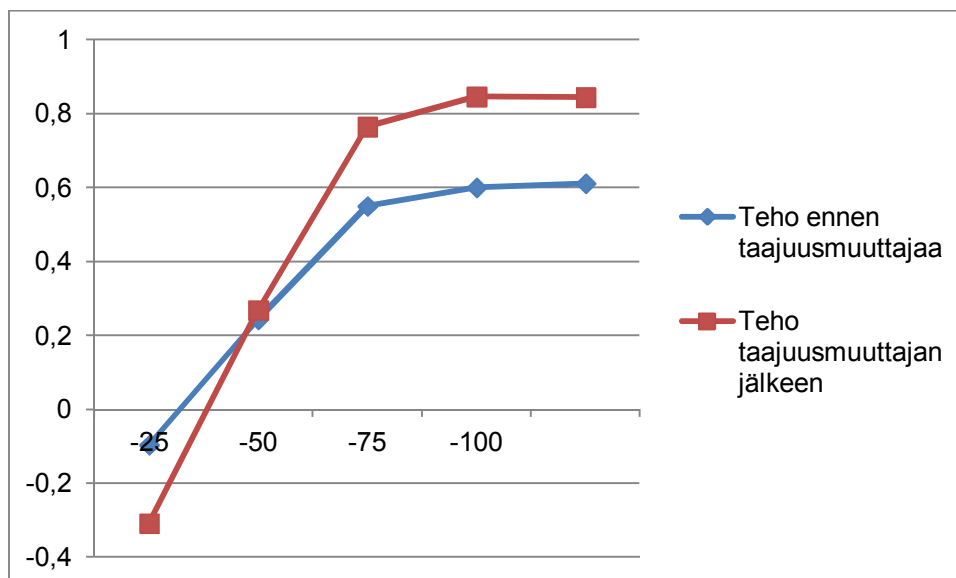
Taulukko 15. Momenttiohjeen ollessa - 100 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	251,51	238,52
I (A)	4,4843	1,4614
P (kW)	0,6111	0,8442
Q (kVar)	0,9721	-0,57823
S (kVA)	3,3732	1,042
λ (tehokerroin)	0,1821	0,8316
φ (Vaihekulma)	79,55	31,71
RPM	1065	
U-dc (V)	114,7	

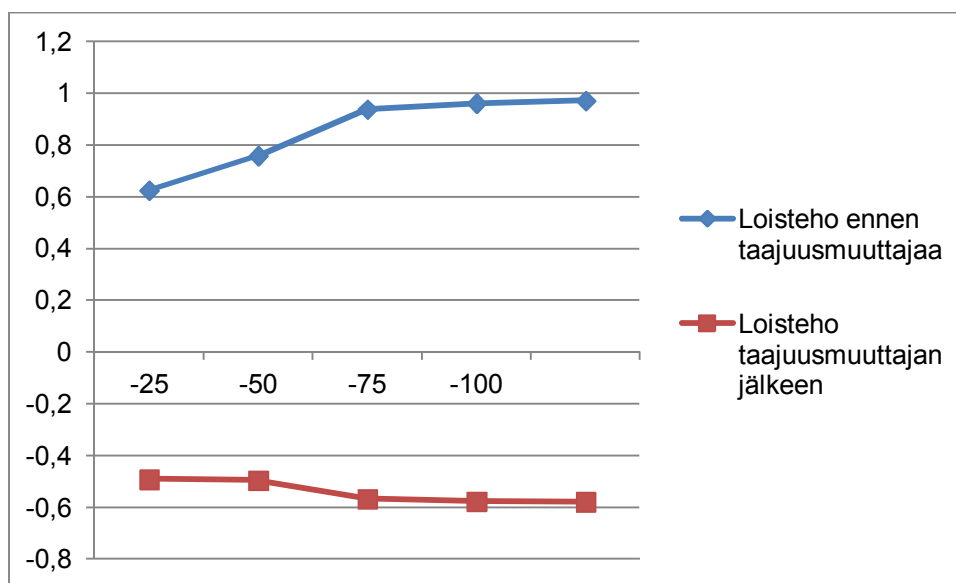
Seuraavaksi 1200 rpm kierrosnopeuksien tehollisarvo käyrinä.



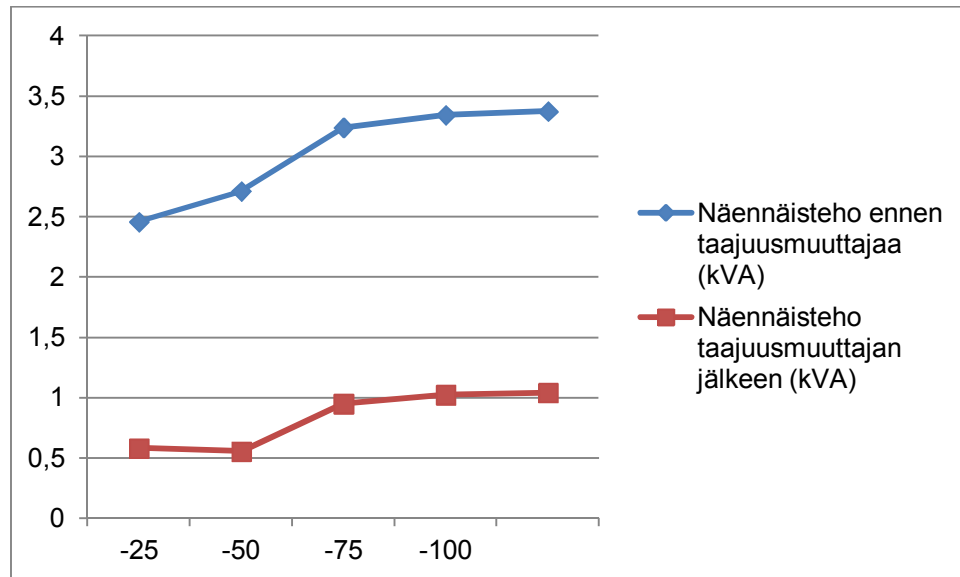
Kuva 8. Virran muutos 1200 rpm kierrosnopeudella.



Kuva 9. Pätötehon muutos 1200 rpm kierrosnopeuksilla.



Kuva 10. Loistehon muutos 1200 rpm kierrosnopeuksilla.



Kuva 11. Näennäistehon muutos 1200 rpm kierrosnopeudella.

Taulukko 16. Tehollisarvot 1435 rpm kierrosnopeudella, momenttiosuuden ollessa 0,5 %:in luokkaa.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	245,54	238,29
I (A)	3,3	0,8334
P (kW)	-0,1047	-0,3126
Q (kVar)	0,5059	-0,50513
S (kVA)	2,422	0,59497
λ (tehokerroin)	-0,0453	-0,5292
φ (Vaihekulma)	92,58	121,48
RPM	1435	
U-dc (V)	148,6	

Taulukko 17. Momenttiosuhteeseen ollessa - 25 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	247,27	238,3
I (A)	3,5787	0,8765
P (kW)	0,3124	0,37981
Q (kVar)	0,7016	-0,51252
S (kVA)	2,6474	0,64405
λ (tehokerroin)	0,1164	0,5906
φ (Vaihekulma)	83,32	52,31
RPM	1353	
U-dc (V)	142	

Taulukko 18. Momenttiosuhteeseen ollessa - 50 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	248,43	238,3
I (A)	4,2502	1,6355
P (kW)	0,6841	1,005
Q (kVar)	0,8861	-0,6168
S (kVA)	3,1607	1,171
λ (tehokerroin)	0,2194	0,8542
φ (Vaihekulma)	77,38	31,08
RPM	1305	
U-dc (V)	138,7	

Taulukko 19. Momenttiosuhteeseen ollessa - 75 %:a.

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	248,7	238,3
I (A)	4,4044	1,7789
P (kW)	0,7583	1,106
Q (kVar)	0,9155	-0,62025
S (kVA)	3,2728	1,271
λ (tehokerroin)	0,2302	0,8704
φ (Vaihekulma)	76,6	29,81
RPM	1298	
U-dc (V)	137,7	

Taulukko 20. Momenttiohjeen ollessa - 100 %:a

Tehollisarvot	Ennen taajuusmuuttajaa	Taajuusmuuttajan jälkeen
U (V)	248,77	238,12
I (A)	4,4639	1,7924
P (kW)	0,7879	1,141
Q (kVar)	0,9218	-0,6311
S (kVA)	3,3089	1,289
λ (tehokerroin)	0,2348	0,8727
φ (Vaihekulma)	76,47	29,1
RPM	1292	
U-dc (V)	137,7	

Kompensoinnin tehoanalysointiarvot

Taulukko 1. AFE-yksikön ja verkon välistä mitatut tehollisarvot.

Vanha virta (A)	Vanha Näennäisteho (kVA)	Kompensoitu virta (A)	Kompensoitu näennäisteho (kVA)
0,7351	0,52727	0,7011	0,50294
0,9345	0,67063	0,6597	0,4736
0,7816	0,58125	0,44	0,32763
1,7924	1,289	1,603	1,1532

Taulukko 2. Generaattorin ja ohjaavan taajuusmuuttajayksikön välistä mitatut tehollisarvot.

Vanha virta (A)	Vanha Näennäisteho (kVA)	Kompensoitu virta (A)	Kompensoitu näennäisteho (kVA)
5,0656	3,7619	4,8315	3,488
4,3899	3,3161	3,099	2,5418
3,618	3,2388	2,03967	1,728
4,4639	3,3089	3,99	2,76

